

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra metalurgie a slévárenství

**Výroba a zkoušení mechanických vlastností litých
kovových pěn**

Production and Testing of Mechanical Properties of Cast
Metal Foams

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zuzana Šigutová**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie
Téma: **Výroba a zkoušení mechanických vlastností litých kovových pěn**
Production and Testing of Mechanical Properties of Cast Metal Foams
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce
2. Slévárenské metody výroby kovových pěn, možnosti využití odpařitelných modelů
3. Experimentální ověření vybraných postupů, návrh vlastní metodiky
4. Diskuze dosažených výsledků
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RADKOVSKÝ, F., KROUPOVÁ, I., LICHÝ, P., BEDNÁŘOVÁ, V. *Optimalizace kompletace polystyrenových modelů pro technologii lost foam v laboratorních podmínkách*. Slévárenství, 2014, roč. LXII, č. 11-12, s. 424-426, ISSN 0037-6825.
- [2] GIBSON, L. J., ASHBY, M. F. *Cellular solids – Structures and properties*. Cambridge university press, 1997. 515 s. ISBN: 0-521-49560-1.
- [3] DRENCHÉV, L. et al. *Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity*. Materials Science and Technology. 2006, Vol. 22, No 10, pp. 1135-1146.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Filip Radkovský

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

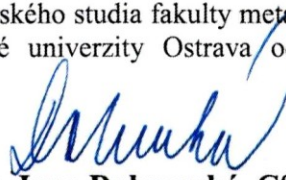
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 23. 4. 2018

Zuzana Šigelová
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Lichému, Ph.D. za odbornou pomoc při vedení této práce, dále pak konzultantovi Ing. Filipu Radkovskému za odborný dohled a asistenci při řešení praktické části, a také za ochotu a trpělivost při vzniku celé práce.

Dále bych chtěla poděkovat svému spolužákovi Bc. Václavovi Mertovi za jeho pomoc při odlévání a jeho nápomocnost. V neposlední řadě děkuji také Ing. Ivaně Kroupové za její cenné rady a připomínky a vlídný přístup.

Díky patří také mé rodině a okolí za podporu při studiu a řešení diplomové práce.

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektů "Studentské grantové soutěže" čísla SP2018/77 „Výzkum a vývoj metalurgických a slévárenských technologií při aplikaci moderních laboratorních zařízení a progresivních metod modelování procesů“ a SP2018/60 „Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství“.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá kovovými porézními materiály, jejich vlastnostmi a jejich využitím především v průmyslu.

Teoretická část práce se zaměřuje na praktické využití kovových pěn od dopravy a stavebnictví až po využití v designu a umění. Práce popisuje jednotlivé možnosti slévárenské výroby kovových pěn s detailním zaměřením na výrobu pomocí metody Lost Foam.

Experimentální část této práce navazuje na tu teoretickou část, která popisuje podrobně metodu Lost Foam. Pomocí této metody byly vyrobeny vzorky s pravidelnou strukturou. Vzorky byly následně podrobeny tlakové a tahové zkoušce i metalografickému rozboru.

Klíčová slova

Kovová pěna, metoda Lost Foam, hliníková slitina, pórovitý kovový materiál, výroba kovové pěny, polystyren, pěna s pravidelnou strukturou.

Abstract

This diploma thesis is applied to metallic porous materials, their properties and their use, mainly in industry.

The theoretical part of this thesis focuses on the practical use of metal foams from transport and civil engineering to design and art. The thesis describes particular alternatives of foundry production of metal foams and in details it focuses on the production using the Lost Foam method.

The experimental part of this work follows on from the theoretical part describing the method Lost Foam. The samples with a regular pattern were made using this method. These samples were subsequently subjected to a pressure and tensile test and metallographic analysis.

Key words

Metal foam, Lost Foam method, aluminum alloy, porous metal material, production of metal foam, polystyrene, foam with a regular structure.

Obsah

Úvod	3
I. TEORETICKÁ ČÁST	4
1. KOVOVÉ PĚNY	4
1.1 Praktické využití kovových pěn	5
1.1.1 Doprava	5
1.1.2 Biomedicína.....	6
1.1.3 Stavebnictví a architektura	7
1.1.4 Procesní inženýrství.....	9
1.1.5 Design a umění	10
2. METODY VÝROBY KOVOVÝCH PĚN	11
2.1 Slévárenské metody	12
2.1.1 Lití na odpařitelný model	12
2.1.2 Zalití výplňového materiálu; využití prekursorů	13
2.1.3 Materiály s mřížovou strukturou	15
3. METODA LOST FOAM.....	16
3.1 Výroba modelu	17
3.2 Povrchová ochrana modelu	18
3.3 Formovací materiál.....	19
3.4 Výhody metody Lost-Foam.....	20
3.5 Vady odlitků a pyrolýza modelových hmot	21
II. PRAKTICKÁ ČÁST	23
1. POSTUP VÝROBY KOVOVÉ PĚNY S PRAVIDELNOU STRUKTUROU	23
1.1 Výroba modelu.....	23
1.1.1 Expandovaný polystyren (EPS).....	25
1.1.2. Vtoková soustava.....	25
1.2 Vnější ochrana modelu	25

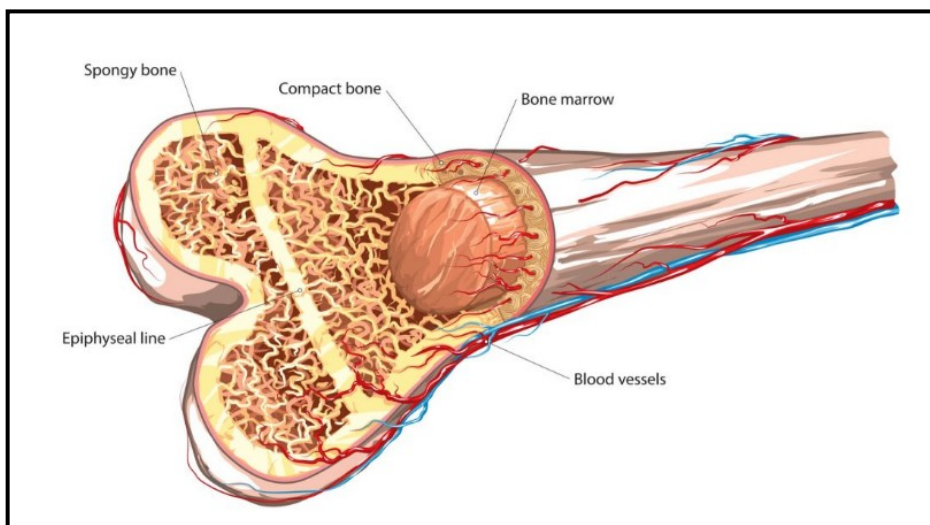
1.3	Formování modelu	26
1.4.	Odlévání	27
1.5.	Čištění odlitku a dokončovací práce.....	27
2.	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	29
2.1	Tlaková zkouška	29
2.1.1	Vlastní měření	30
2.2	Tahová zkouška	34
2.2.1	Vlastní měření	34
2.3	Metalografická zkouška.....	37
2.3.1	Odběr vzorku.....	38
2.3.2	Broušení vzorku	38
2.3.3	Leštění vzorku	39
2.3.4	Leptání vzorku.....	39
2.3.5.	Vlastní měření	40
	Závěr.....	43
	Použitá literatura.....	45

Úvod

V dnešní době poptávka po odlehčených materiálech stále roste, zejména v průmyslovém odvětví. Hlavním důvodem tohoto nárůstu je úspora hmotnosti materiálu a snižování nákladů. Dnešní porézní materiály jsou již na dobré úrovni, co se týče zvládnutí technologie výroby a aplikace. [1]

Inspiraci k využití porézních materiálů v průmyslu nemusíme hledat nijak zvlášť složitě. Každý z nás v sobě nosí porézní strukturu v podobě kostí. Kost je tvořena tvrdou schránkou (okosticí) a vnitřní „houbovitou“ strukturou (viz. obr. č. 1). Vnitřní houževnatou strukturu tvoří dvě základní složky, kolagen a minerální složky. Kolagen je přítomen ve vláknitých svazcích a dává kostem potřebnou elasticitu. Minerální složky tvoří 65 % hmotnosti kostí a mezi nejdůležitější se řadí vápník a fosfáty. Tyto dvě složky kostem dodávají naopak pevnost, tvrdost a tuhost. Důležitým parametrem k určení pevnosti je způsob spojení minerálních látek s kolagenem. Podobné vlastnosti mají také další z přírodních materiálů – korály, bambus (využití jako konstrukční materiál k výrobě lešení). [2]

Tato diplomová práce je zaměřena na vlastnosti a využití kovových pěn. Dále se práce zaměřuje především na metodu přesného lití – Lost Foam. Zmíněná metoda je dále popsána na konkrétním příkladu v experimentální části, kdy byla využita k výrobě vzorků. Na vzorcích byla provedena tlaková zkouška, metalografická zkouška a tahová zkouška.

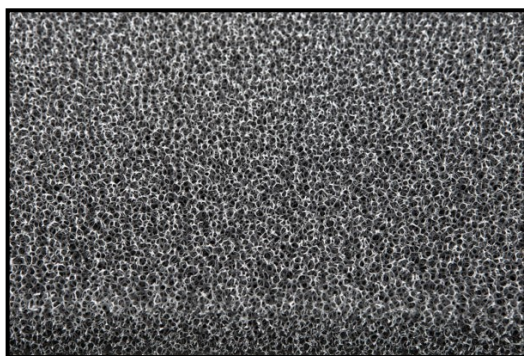


Obr. č. 1: *Struktura lidské kosti* [2]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. KOVOVÉ PĚNY

Pod pojmem kovových pěn si lze představit lehký, pórovitý materiál s buněčnou strukturou, ovšem s dobrými mechanickými vlastnostmi (ukázku kovových pěn z hliníkových slitin zobrazuje obrázek č. 2 a č. 3). Pórovitost, tedy poměr prázdného prostoru k celkovému objemu, je u těchto materiálů v rozmezí 75 až 95 %. Dutiny mohou být spojeny otevřenými póry, v takovém případě se označuje jako kovová pěna s otevřenými buňkami. Pokud póry nejsou propojeny přes otevřené kanálky, ale jsou od sebe odděleny pevnými stěnami, označuje se taková pěna jako pěna s uzavřenými buňkami. Vysoká pórovitost těchto kovových pěn je činí velmi lehkým materiálem, což umožňuje široké využití zejména v případech, kdy je hmotnost hlavním konstrukčním omezením. Další předností kovových pěn je jejich tvarová rozmanitost a povrchová čistota. Od 90. let zájem o kovové pěny stoupá a výroba kovových pěn tak vykazuje nárůst, čímž se také částečně snižuje jejich cena. Pěny jsou vyráběny odléváním a případným spojováním. Mezi nejpoužívanější pěny se řadí hliníkové pěny, za nimi následují pěny na bázi niklu. Některé druhy kovových pěn mohou být vyráběny s předem danými vlastnostmi v závislosti na konkrétní aplikaci pěny. Pěny jsou mechanicky stabilní a lehce tvarovatelné. Použití těchto pěn snižuje spotřebu materiálu i energie a v některých případech také snižuje náklady. Většina pěn má vysokou tepelnou a elektrickou vodivost a nízkou tepelnou kapacitu. Jejich chemická a korozní odolnost je dobrá, pěny disponují vysokou teplotní stabilitou a velmi dobře tlumí vibrace a elektromagnetické stínění. Jsou nehořlavé, nevýbušné a recyklovatelné. Pěny s otevřenými buňkami jsou vysoce odolné a mají značnou plošnou hustotu (až do $5600 \text{ m}^2/\text{m}^3$). [3,4]



Obr. č. 2: Kovová hliníková pěna [5]



Obr. č. 3: Kovová hliníková pěna [5]

1.1 Praktické využití kovových pěn

Kovové pěny našly velké uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích (dopravní, letecké, obranné, námořní, energetické i architektonické). Pěny se uplatňují jako multifunkční materiály ve výkonných aplikacích civilního, mechanického, chemického i biomedicínského inženýrství. Postupně se kovové pěny dostávají i do spotřebního zboží (např. sportovní pomůcky, cestovní kufry apod.). Golfový putter, vyrobený z kovové pěny, má dobré tlumicí schopnosti, je lehký a celkově tak zlepšuje ovládání úderu. [6]

1.1.1 Doprava

Rozsah využití hliníkových kovových pěn je široký. V autobusech našly pěny uplatnění jako tlumiče hluku, čímž došlo ke snížení hluku o 5dB v porovnání s běžným tlumičem. Díky svým tlumivým vlastnostem je tento materiál obsažen ve vlakových kolejních, tunelech metra i výtazích. V automobilovém průmyslu se pěny používají např. v autosedačkách či nádržích. Jako nárazové prvky součásti kostry karoserie je využívá např. firma Audi AG. Jedním z příkladů využití pěn v automobilovém průmyslu je hliníková skořepina s jádrem tvořeným hliníkovou pěnou, zobrazena na obr. č. 4. S vývojem nových technologií a nástupem elektrických automobilů se kovové pěny stále více stávají nedílnou součástí výrobního procesu. U elektromobilů je ještě více kladen důraz na snižování hmotnosti, tudíž jsou zde pěny vhodným materiálem. Tramvajové vozy typu Combino, využívané v Budapešti, mají pěnové bloky umístěné za nárazníkem, aby v případě nehody absorbovaly náraz. Tyto tramvaje využívají materiál vyrobený firmou ALULIGHT International GbmH. [6]



Obr. č. 4: Hliníková skořepina s jádrem z hliníkové pěny [7]

- **ALULIGHT panely** – jedná se o porézní, izotropní hliníkový materiál s buněčnou strukturou. Panely mají dobrou akustickou absorpci a dobře pohlcují elektromagnetické záření. Při své nízké hmotnosti jsou velmi tuhé, dobře izolují a jsou odolné proti požáru. Materiál velmi dobře tlumí nárazy bez ohledu na směr nárazu. Panely jsou zcela recyklovatelné a mnohem stabilnější než organické materiály (dřevo, plast). Konstruují se do podoby „sendvičů“ buďto uzavřené z obou stran nebo jen jedné z nich. [8]

Vzhledem ke schopnosti odolat vysokým teplotám, ve spojení s vlastnostmi pohlcující zvuk, se využívá kovových pěn i k výrobě tlumiče výfuku. Ve vojenské technice jsou kovové pěny velmi atraktivní pro jejich možnost absorpce nárazu. Jsou používány jako ochranné panely vozidel proti výbuchu. Pro lodní průmysl jsou pěny vyvíjeny na konstrukci nákladních lodí, čímž dojde k rapidnímu úbytku hmotnosti celé lodi a zvýšení dopravní výkonnosti. Velký hluk ze strojovny je možno snížit použitím kovových pěn i při konstrukci kabin a vnitřního vybavení lodi. V leteckém průmyslu je úspora hmotnosti velmi důležitým hlediskem, proto i v tomto odvětví se stále více využívá kovových pěn z hliníku a titanu, např. jako součást ramen ocasu vrtulníku. V této oblasti je finanční návratnost poměrně velká. Příkladem je trup letadla vyrobený z hliníkových plechů se svařenými nebo nýťovanými vzpěrami. V případě nahrazení klasických materiálů za zakřivenou pěnovou strukturu by došlo k tlumení hluku i vibrací a vzniku určité tepelné izolace. Materiál může být kompletně recyklován a je nehořlavý. Úspora zhruba 1 kg hmotnosti trupu zajistí během celkové životnosti letadla finanční úsporu až jeden milion eur. Úsporou hmotnosti se sníží i spotřeba paliva na provoz. V kosmickém průmyslu se pěny využívají například jako výztuže pro nosné konstrukce družic aj. [6]

1.1.2 Biomedicína

V biomedicinském odvětví se kovové pěny uplatňují jako ortopedické implantáty (obr. č. 5). Manipulací s hustotou a strukturou těchto pěn lze docílit, aby mechanické vlastnosti pěnové kostní náhrady odpovídaly struktuře a vlastnostem samotné kosti. Morfologie těchto pěn nezabraňuje růstu kostí a tkání, naopak tento růst podporuje.

Na výrobu těchto implantátů se nejčastěji používá titanových pěn s vysokou pórovitostí, dále i hořčíkové pěny. Titanové pěny disponují výbornou biologickou kompatibilitou. [6]



Obr. č. 5: *Ortopedické implantáty z kovových pěn [9]*

1.1.3 Stavebnictví a architektura

Ve stavebnictví našly kovové pěny uplatnění jako lehké stavení desky, které dobře tlumí hluk, disponují chladíci a zároveň tepelnými vlastnostmi, dobře chrání před požárem a elektromagnetickým zářením. Využívá se v kancelářích, koncertních sání, sportovních centrech aj. Panely z kovových pěn (obr. č. 6) dobře pohlcují zvuk, který vedou dovnitř samotné pěny, čímž ho následně ztlumí. Kovových pěn lze využít také na vnější konstrukce, balkóny nebo fasády budov. Díky výborným zvukotěsným vlastnostem se pěny využívají v konstrukcích mostů a tunelů. V architektuře jsou pěnové kovové materiály přitažlivé svou rozmanitostí. Kovové pěnové desky lze vyrobit v různých variantách a v různých stupních průhlednosti, což umožňuje široké designové využití. Šperkařská firma Repossi využila hliníkových pěn k výstavbě schodiště v jednom ze svých obchodů v Paříži (obr. č. 7). [6,10]

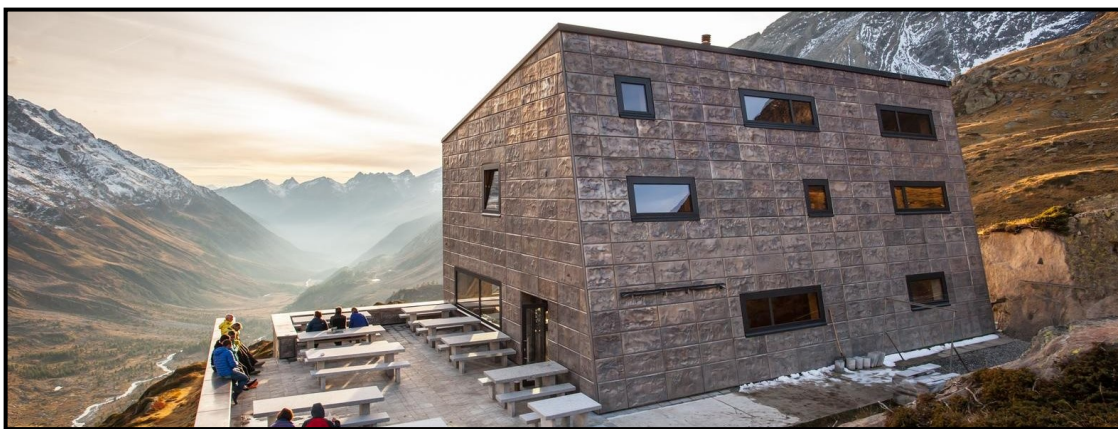


Obr. č. 6: *Panel z kovové pěny* [11]



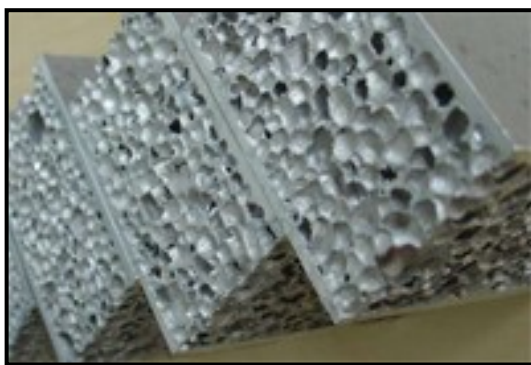
Obr. č. 7: *Schodiště z kovové pěny* [10]

Jedním z názorných příkladů využití hliníkových kovových pěn jako fasády budov je horská chata Anenhütte, postavená uprostřed švýcarských Alp (viz. obr. č. 8). Chata leží na Montblanském masivu, čímž je vystavena neustálému působení extrémních podmínek počasí. Vítr zde dosahuje rychlosti v nárazech až 250 km/h, působí zde silné ultrafialové záření a dochází zde k velmi častým výkyvům teplot. V zimě na chatu působí velký tlak sněhu, který mnohdy dosahuje až výšky osmi metrů. Původní dřevěná chata vydržela za výše uvedených povětrnostních podmínek pouze tři roky. Proto byla firmou CHRISTIAN POHL GMBH vyvinuta speciální fasáda pro tento typ budovy. Fasáda se skládá z pěnového hliníkového jádra a dvou krycích hliníkových vrstev. Konstrukce je čistě hliníková, není spojována lepidly ani jinými spojovacími součástmi. [12]

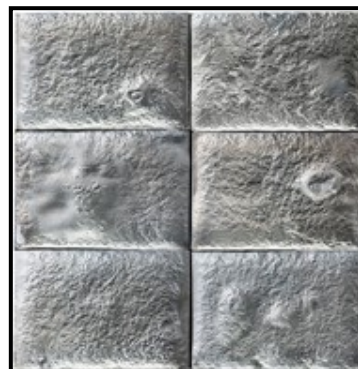


Obr. č. 8: *Horská chata Anenhütte* [12]

- **Kovové pěnové desky a dlaždice** – výrobcem speciálních hliníkových kovových pěnových desek (AFS® desky) bez použití lepidel je firma Pohltec metalfoam GmbH. Hliníková pěna jako taková disponuje vysokou stabilitou, minimální hmotností a zejména fascinující strukturou pórů. Tyto aspekty přispěly ke vzniku „sendvičovým“ kovovým deskám. Celá deska je z jednoho materiálu, pěnové jádro se nachází mezi dvěma stěnami (obr. č. 9). Zejména pro oblast designu byly vyvinuty dlaždice kovové vyobrazené na obr. č. 10. Jsou vyráběny až do tloušťky 15 mm, jsou nehořlavé a odolné až do teplot 560 °C. Neobsahují žádné škodlivé látky, jsou plně recyklovatelné bez rozpouštědel a lepidel. AFS® desky se mimo jiné používají jako podpora pracovní plošiny pro mobilní jeřáby firmy TEUPEN Maschinenbau GmbH. Oproti ocelovému předchůdci dochází k úbytku hmotnosti až o 95 kg. [13]



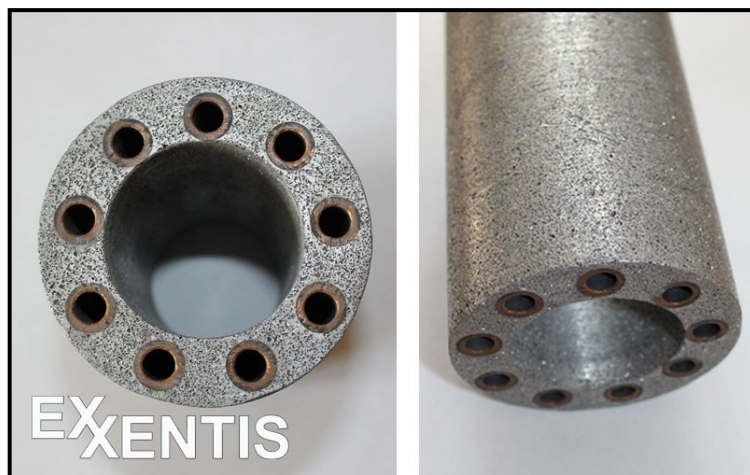
Obr. č. 9: Hliníkové pěnové desky - AFS® desky [13]



Obr. č. 10: Kovové dlaždice [13]

1.1.4 Procesní inženýrství

V procesním inženýrství mohou být kovové pěny využívány k ochraně vodíkových nádrží nebo jako protihlukové systémy v regulátorech plynu. Pórovitý hliník tvoří ideální materiál k výrobě výměníků tepla, příklad takového výměníku zobrazuje obr. č. 11. Díky své dobré tepelné vodivosti výborně přenáší teplo. Vzhledem k jeho velkému vnitřnímu povrchu má vyšší tepelnou výměnu než běžný hliník. V závislosti na velikosti pórů tepelná vodivost pórovitého hliníku dosahuje hodnot v rozmezí $30 - 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Materiál je vhodný také pro chlazení, ochlazovaný předmět je připojen k poréznímu hliníku a teplo se rozšíří na vnější stranu. Mimo to jsou kovové pěny dobrými elektrodovými materiály pro dobíjecí baterie a palivové články, dále využívané jako průmyslové filtry. [14]



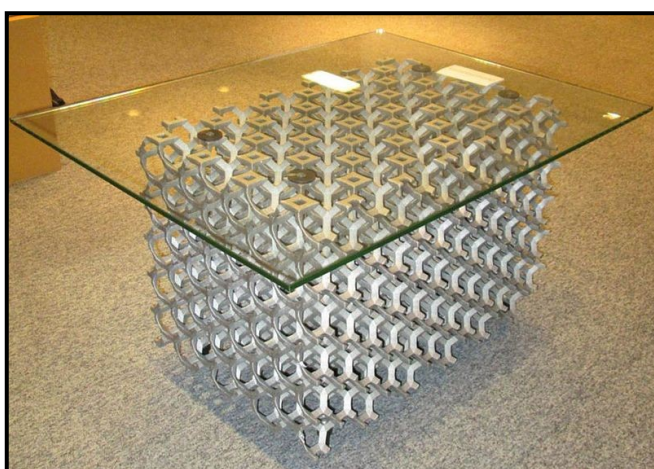
Obr. č. 11: *Výměníky tepla z hliníkových pěn [14]*

1.1.5 Design a umění

Uplatnění kovových pěn se rozšiřuje i za hranice čistě průmyslového odvětví. S kovovými pěnamí začali postupem času pracovat také umělci a designéři. Německý návrhář Gerd Kaden ve své tvorbě využíval kovových pěn v kontrastu se dřevem a přírodními materiály. Zavádí se nové trendy v použití pěn i do spotřebního zboží a sportovního vybavení. Kovové pěny se využívají při výrobě ozdobného nábytku (židle, stoly, lampy apod.), ale i například jako součásti reproduktorů. Příklad ozdobné lampy vyrobené z kovové pěny vyobrazuje obrázek č. 12 a kovový stůl v kombinaci se sklem lze vidět na obrázku č. 13. Pěny lze nalézt i v kuchyňském vybavení např. varná deska s hliníkovou pěnovou vložkou vykazuje vynikající rovnoměrné rozložení tepla. [6]



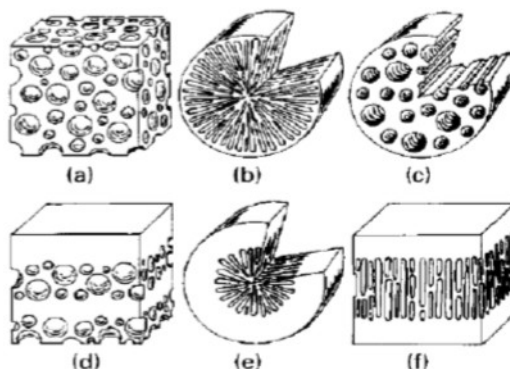
Obr. č. 12: *Designová lampa z kovové pěny [15]*



Obr. č. 13: *Stůl vyrobený z kovové pěny s pravidelnou strukturou [16]*

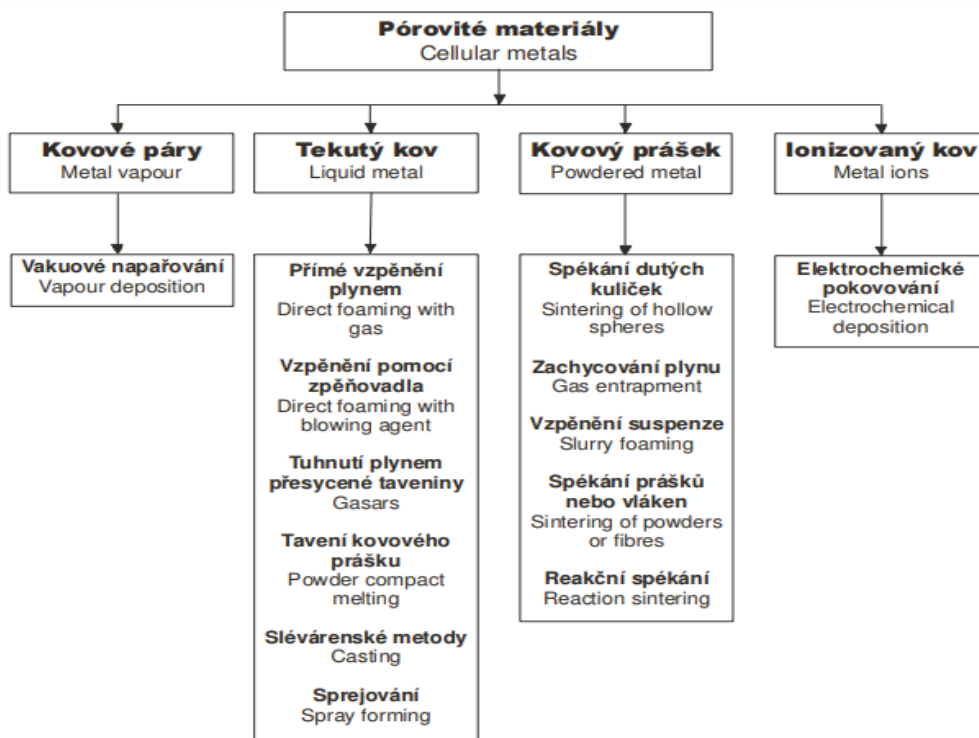
2. METODY VÝROBY KOVOVÝCH PĚN

V praxi se lze setkat s řadou různých metod a postupů při výrobě kovových porézních materiálů. Póry těchto materiálů mohou mít odlišnou podobu a lišit se svým tvarem. Příklady těchto typů pórů zobrazuje obrázek č. 14.



Obr. č. 14: Typy pórů (a – kulaté póry, b – radiální póry, c – válcové, d, e, f – laminární rozmístění)[17]

Tyto výrobní postupy se dělí na čtyři základní skupiny, podle toho v jakém stavu je kov zpracováván. Jedná se o materiály vyráběné z kovových par, tekutého kovu nebo kovového prášku. Poslední variantou je výroba z ionizovaného kovu. Všechny výrobní postupy jsou schematicky zobrazeny na obrázku č. 15. [18]



Obr. č. 15: Schéma výrobních postupů výroby kovových pěn [18]

2.1 Slévárenské metody

Slévárenské metody výroby kovových pěn využívají tekutého kovu vlévaného do připravených forem.

2.1.1 Lití na odpařitelný model

Tato technologie se využívá k výrobě kovových pěn s otevřenými póry. Výroba je uskutečňována pomocí polymerních pěn (viz. schéma výrobního postupu na obr. č. 16). V případě polymerních pěn se jedná o sestavu složenou z polymerní matrice, obklopenou bublinkami vzduchu. Dutiny se označují jako póry nebo buňky. Hustotu daného materiálu pak udává poměr mezi polymerem a vzduchem. Tato hustota, velikost a množství pórů se může lišit podle způsobu zvolené technologie. Morfologie a hustota buněk má významnou souvislost s mechanickými vlastnostmi polymerní pěny. Dále velikost pórů ovlivňuje také akustické vlastnosti. K výrobě polymerních pěn se využívají polymery: [18, 19]

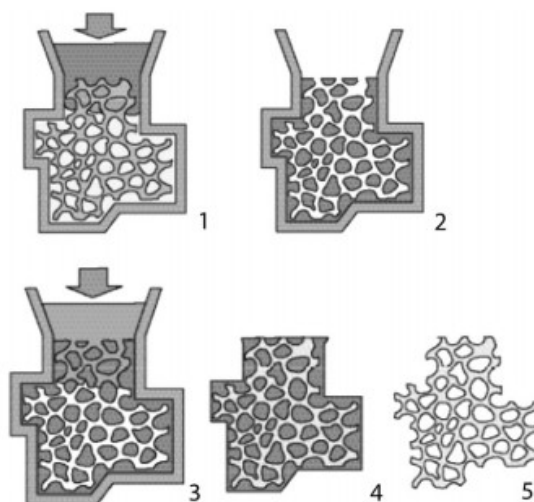
- **s uzavřenými buňkami** – do této skupiny lze zařadit polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), etylenvinylacetát (EVA) aj.
- **s otevřenými buňkami** – typickým zástupcem této skupiny je polyuretanová pěna (PUR pěna)

Principem metody na spalitelný model je vyplnění pórů polymerní pěny žáruvzdorným materiálem. Jako žáruvzdorný materiál lze použít sádro, případně směs mullitu, uhličitanu vápenného nebo fenolové pryskyřice.

- **sádra** – jedná se o hemihydrát síranu vápenatého ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), který je za normálních podmínek pevná mikrokrytalická látka bílé barvy. Nejznámější formou výskytu je již zmíněná sádra, která je uměle vyráběna pro široké možnosti použití.

Ve spojení s vodou se sádra stává tekutou. Díky vysoké tekutosti je schopna zatéct i do záhybů a dokonale tak vyplnit složitý tvar modelu. Ke zhutnění formy lze pomoci vibracemi a při použití vakua lze dosáhnout méně pórovité sádrové formy. Takto zhotovená forma se vysuší do konstantní hmotnosti a následně při 800 °C vyžihá. Žihací proces nám zaručí vyžihání sádrové formy a mimo jiné také úplné spálení polymerní pěny. Tímto ve formě vznikne prostor pro odlévání kov, který vyplní dutinu formy a přesně zkopíruje strukturu polymerní pěny. Ve snaze zlepšit zabíhavost lze využít spojení vakuového a tlakového lití. Finální operací je rozbití sádrové formy a čištění odlitku kovové pěny, které

může probíhat např. v ultrazvukové lázni. Uplatnění sádrových forem lze najít hlavně u slitin z neželezných kovů. [18]



Obr. č. 16: Schéma výroby kovových pěn s využitím polymerní pěny [20]

2.1.2 Zalítí výplňového materiálu; využití prekursorů

V tomto způsobu výroby jde o vlévání tekutého kovu do dutiny formy, přičemž je forma zaplněna anorganickými nebo organickými granulemi. Zmíněné granule se nazývají prekursory. Granule se následně z odlitku odstraňují loužením či žháním. Podmínkou pro odstranění granulí je jejich vzájemný dotyk. V případě „syntaktických pěn“ granule v odlitku zůstávají. Kuličky jsou vyrobeny z písku nebo z vypálené hlíny. Dále mohou být z oxidu hlinitého, ze soli, případně lze použít vermikulit. Kovové pěny vyrobené pomocí prekursorů mají svou strukturu nepravidelnou neboli stochastickou. [18]

- **polymerní kuličky** – jedná se o technologii, která využívá organického materiálu polymerních kuliček vyrobených z polystyrenu. Povrch kuliček je pokrytý pryskyřicí. Tekutý kov je nutné do formy vstřelit velkou rychlostí, kov tak ztuhne ještě před tím, než se polystyrenové kuličky spálí. Pórovitost pěn, vyrobených touto technologií, dosahuje až 86%, s rozměry pórů od 1 do 3 mm. Technologie je vhodná k výrobě menších odlitků. Pro odstranění zbylého polystyrenu s pryskyřicí se materiál vloží do pece, kde se ohřívá přibližně při 400 °C.

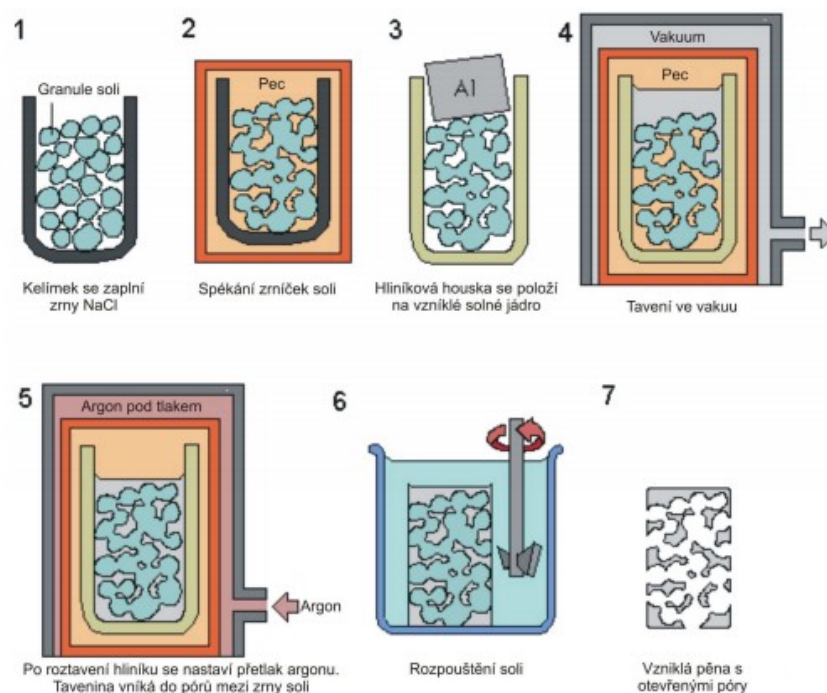
- **preforma rozpustná ve vodě** – tento způsob využívá výplňového materiálu rozpustného ve vodě, který byl vyvinut ve švýcarském federálním technologickém institutu.

Použitý materiál musí odolat teplotám roztaveného kovu, ale zároveň je schopen rozpustit se ve vodě. Nejběžnějším materiálem k výrobě preforem je, především z ekonomických důvodů, kamenná sůl. V první fázi se sůl ve formě střešá do požadované hustoty, následuje spečení a ochlazení soli. Díky tomuto procesu se z jednotlivých zrn soli získá spečenec s kanálky, do kterých se v dalších krocích dostane tekutý kov. Z hotové formy se sůl odstraní rozpuštěním ve vodě. Celý proces je znázorněn na obrázku č. 17.

- nejjednodušší variantou zaplnění kanálků je nalití roztaveného hliníku přímo do formy. Takto se odlévají kovové pěny s otevřenými póry o velikostech, jež přesně odpovídají solným granulím. Minimální velikost vzniklých pórů je zhruba 1 mm. Lze dosáhnout pórovitosti až 85%.

- druhou možností je využití vakua a zvýšeného tlaku. Preforma ze soli je umístěna ve vakuu, přičemž kov se taví na jejím povrchu. Záměnou vakua za přetlak plynu vnikne tavenina do všech kanálků formy.

Metodou lze vyrobit velmi kvalitní kovové pěny s porezitou od 50 μm až do 5 mm. Důležitá je volba slitiny, která nesmí reagovat se solí ani s vodou. Celý proces je poměrně dost časově náročný a nákladný. [18]

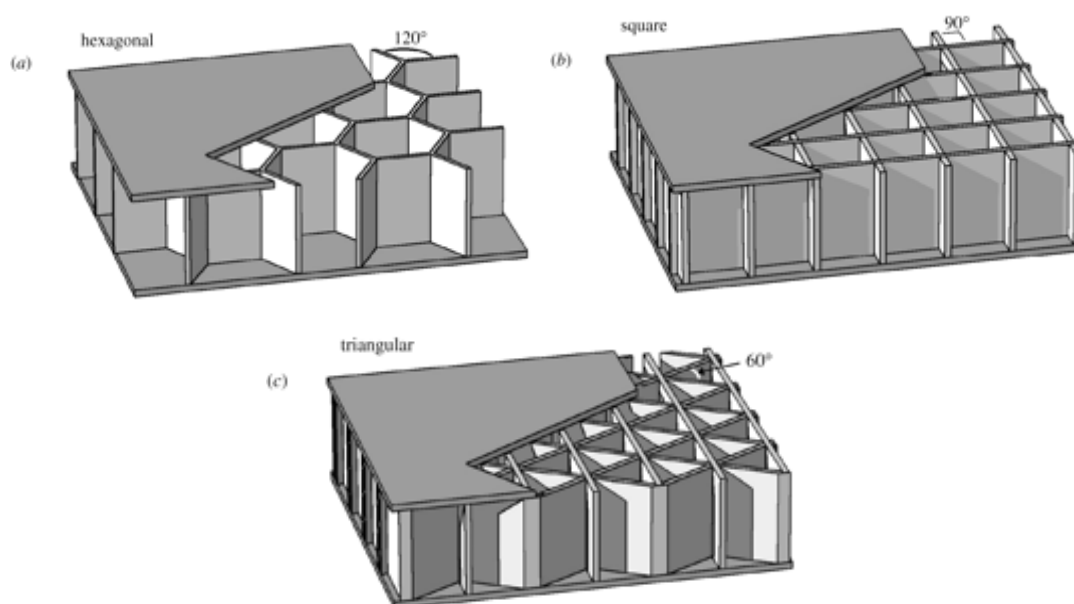


Obr. č. 17: Proces výroby hliníkových pěn pomocí prekursorů [18]

2.1.3 Materiály s mřížovou strukturou

Pórovité materiály vyrobeny touto technologií mají pravidelnou strukturu. Výroba modelů se provádí lepením, tvářením, vstřikováním vosků do forem nebo lze využít moderních technologií v podobě 3D tisků. Metoda funguje na principu spalitelného modelu, kdy kov přesně zkopíruje tvar a složitost modelu. Konstrukce je složena z buněk o tvaru čtverce, trojúhelníku, šestiúhelníku aj. (obr. č. 18). Výsledný materiál přináší nepostradatelnou úsporu materiálu a hmotnosti a to až o 90% oproti plnému materiálu. Materiál disponuje výbornými mechanickými vlastnostmi. V cizojazyčné literatuře je možné setkat se s označením lattice block materials (LBM), lattice block structures (LBS) nebo cast cellular structures (CCS). [18]

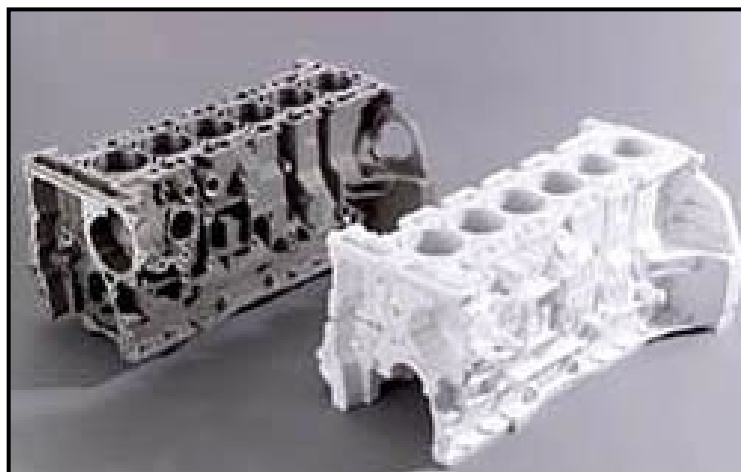
Jedním z výrobců lattice block materials (LBM) je firma JAMCORP, která vyrábí komponenty z JBM pro konstrukční součásti v leteckém, lodním a vojenském průmyslu. [21]



Obr. č. 18: Příklady různých typů materiálů s mřížovou strukturou (a – šestiúhelníková struktura, b – čtvercová struktura, c – trojúhelníková struktura) [22]

3. METODA LOST FOAM

Metoda byla patentována v roce 1958 profesorem H. F. Shroyerem. Hlavním důvodem zavedení tohoto způsobu výroby byla skutečnost odlévání tvarově složitějších odlitků. Tímto byl odstraněn problém s možnou deformací formy při vytahování dřevěných modelů a jejich následnou opravou. Dřevěné modely byly tedy nahrazeny modely polystyrenovými – spalitelnými. Model se jednoduše vypaří působením horkého kovu a vzniklé plyny uniknou skrz formovací směs pryč z formy. Tekutý kov přesně kopíruje vzor a tvar polystyrenu. V roce 1982 tuto technologii využila firma Ford, kdy takto odlila hlavy válců z hliníkové slitiny. Další velkou firmou, která začala technologii využívat, byla firma Fiat. Započala tak hromadnou výrobu menších produktů. [23, 24, 25]

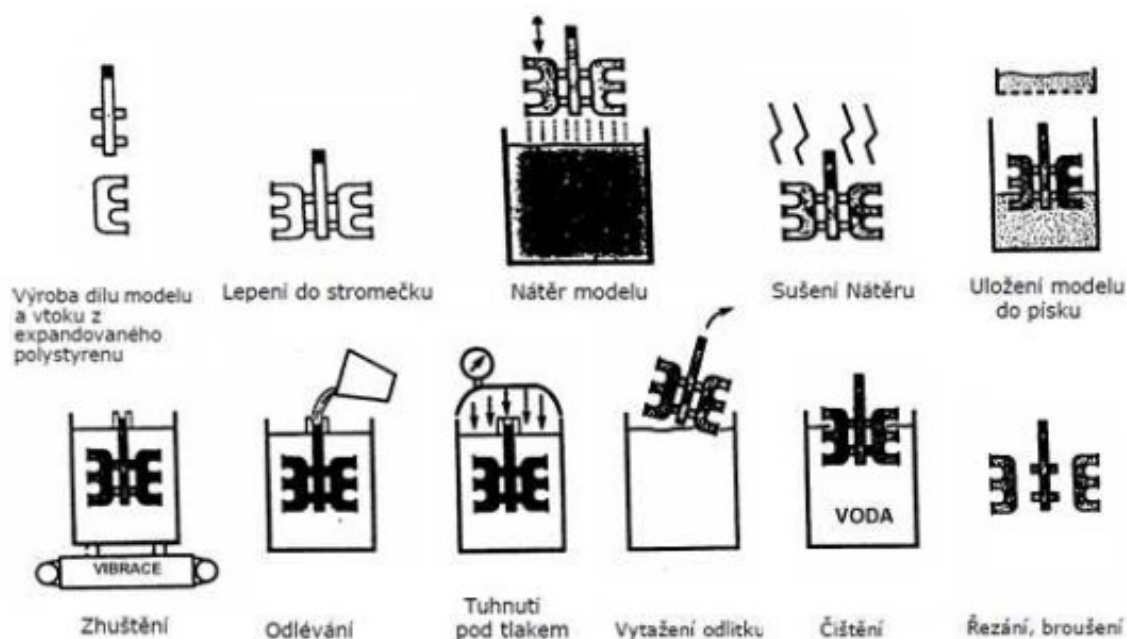


Obr. č. 19: *Polystyrénový model a hotový odlitek [24]*

Zkladním rozdělovacím parametrem této metody je skutečnost, zda se jedná o sériovou výrobu nebo o jednotlivé kusy. Díky tomuto se zohledňují následující parametry:

- **výroba jednotlivých odlitků:** model z polystyrenu se zhotovuje lepením, řezáním a jinými mechanickými způsoby. Model může být celý zkompletován pouze ručně. K formování se využívá formovací směsi obsahující pojivo. Využití metoda našla při výrobě lisovacích a tvářecích nástrojů. Metoda je využívána i k výrobě odlitků z tvárné a šedé litiny.

- **sériová výroba odlitků:** při velkých sériích se vyplatí vytvořit model ve vypěňovací formě. Jako formovací materiál je používán především křemenný písek, bez přítomnosti pojiva. Tento způsob je využíván více u drobnějších výrobků. [26]



Obr. č. 20: Schematické zobrazení metody Lost Foam [27]

3.1 Výroba modelu

K výrobě modelu pro technologii Lost foam se využívá expandovaného polystyrenu (EPS). Jedná se o polymerní konstrukční materiál v podobě kuliček, které zahříváním expandují. Kuličky lze tak při velké rychlosti vstřelovat do forem (jaderníků) a vytvářet tak i tvarově velmi složité modely. Nutné je provádět následné chlazení modelu. Ve vypěňovací formě se provede vypěnění, forma je součástí vypěňovacího lisu. Pokud je potřeba model vyrobit z více částí, jednotlivé díly, včetně vtokové soustavy, se k sobě připevňují slepením. Finální vzorek je tvořen přibližně 97,5 % vzduchu a 2,5 % polystyrenu. Příklad stroje k vypěňování polystyrenu je znázorněn na obrázku č. 21. [26, 28]



Obr. č. 21: *Vypěňovací stroj firmy Kurtz ersa [29]*

3.2 Povrchová ochrana modelu

Hotový model, včetně vtokové soustavy, je nutné opatřit ochrannou vrstvou v podobě nátěru. Nátěr musí být dostatečně prodyšný, kompaktní a nanášený v rovnoměrné, tenké vrstvě. Nátěr jednak pomáhá odvádět vzniklé plyny do směsi, ale také zabraňuje, aby nedošlo ke strhnutí písku do dutiny formy působením tekutého kovu. Aplikace se provádí natíráním (pomocí štětce, hlavně u velkých modelů), namáčením (zejména u menších a drobných modelů), nebo postřikem. V určitých případech, kdy jsou součástí modelu tepelně exponovaná místa, provádí se nátěr na zmíněná místa ve dvojí vrstvě. Tyto místa se opatří nátěrem nejdříve, nanesení nátěru na celý model se provádí až ve druhé vrstvě. Neméně důležité je sušení modelů, které se provádí za teplot 50 – 60°C. [26]

Rozlišujeme tři typy nátěrů:

- kokso-grafitové nátěry: nesnesou velké tepelné zatížení a při delším časovém působení je zapotřebí větší vrstvy nátěru (cca 3 mm).
- aluminosilikátové nátěry: nátěr na bázi vody byl vyvinut speciálně pro výrobu metodou spalitelného modelu – Lost foam.
- zirkonové nátěry: jedná se o nátěr na lihové i vodní bázi. Vykazuje patřičnou odolnost i při vyšším působení tepelné expozice a to již od tloušťky 0,5 mm. [26]

3.3 Formovací materiál

Formování může být provedeno včetně pojiva nebo bez použití pojiv. Při formování drobnějších odlitků je model zasypán formovací směsí bez použití pojiv. Takto zhotovená forma je zhuštěna vibracemi, které formě poskytnou dostatečnou pevnost. Naopak u formování větších odlitků se využívá formovacích směsí s použitím pojiv (samotvrdnoucí směsí).

Při formování, kdy je využíváno pojiv, jde o vazné a samotvrdnoucí směsi. Tyto technologie lze rozdělit podle způsobu uložení modelu.

- **formování bez vyjmutí modelu:** pro vytvoření dutin se do formy vkládají písková jádra. Polystyrenový model je z formy odstraňován důsledkem působení tekutého kovu při plnění formy. Při tomto způsobu vznikají škodlivé výpary, které unikají do prostor slévárny a snižují tak kvalitu pracovního prostředí.

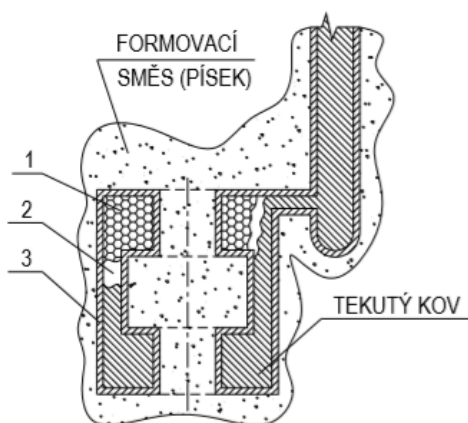
- **formování s vyjmutím modelu:** v této variantě lze model z formy vyjmout, lze tak model vyrobit z méně kvalitního polystyrenu s ohledem na vývin plynů. Další výhodou jsou menší úkoly oproti dřevěným modelům. Model lze znovu použít, pokud se ovšem nenaruší při vyjímání, např. rozřezáním apod. Zmíněná varianta je vhodná k výrobě nízkouhlíkatých ocelí, kdy nedochází k povrchovému nauhličení oceli uhlíkatými produkty, které při spalování polystyrenu vznikají. Samotná výroba modelu se provádí lepením, řezáním a obráběním z polotovarů (desky, bloky). [26]

Do bezpojivového způsobu formování řadíme dvě varianty.

- **zasypání kovovými broky (magnetický způsob):** princip spočívá v zasypání polystyrenového modelu kovovými ocelovými broky, následného zhuštění vibracemi a díky magnetickému obvodu se forma zpevní. Magnetické pole působí po celou dobu lití a chladnutí odlitku. Výhodou metody je rychlé chladnutí odlitku a jeho řízené tuhnutí. Při lití je možné použít částečného vakua. Po vypnutí magnetického pole lze odlitek jednoduše vyjmout vyklopením spolu s broky z formy. Kovové broky se po relativně snadném očištění dají opětovně použít. Dalším z pozitivních vlivů této technologie je nepoužívání křemenného písku.

- **zasypání křemenným pískem:** forma se vyplňuje suchým křemenným pískem nasypáním na model. Následné zhutnění formy se provádí vibracemi, ty však nesmí být příliš vysoké, protože by mohlo dojít k deformaci a narušení modelu. Naopak je zapotřebí,

aby vibrace nebyly příliš slabé, mohlo by totiž dojít ke špatnému vyplnění formy. Formovací materiál musí splňovat dobrou prodyšnost, aby mohly odcházet vzniklé plyny ze spalování polystyrenu. Vyjmutí modelu je v tomto případě jednoduché, buďto vyklopením nebo přímým vytažením odlitku z formy. Křemenný písek je regenerovatelný, časem ovšem černá a obsahuje produkty pyrolýzy. [26, 30]



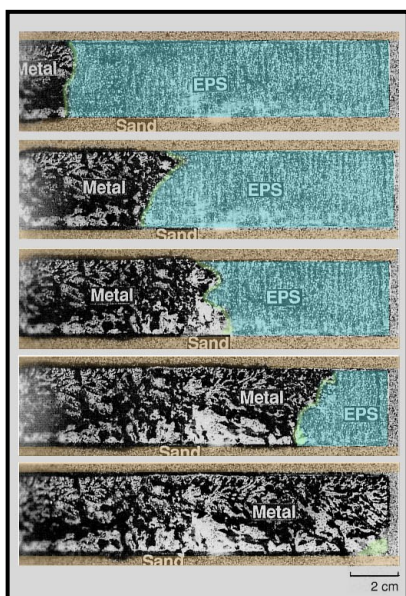
Obr. č. 22: Příklad plnění formy tekutým kovem (1 – polystyrenový model, 2 – plyn, 3 – ochranný nátěr) [30]

3.4 Výhody metody Lost-Foam

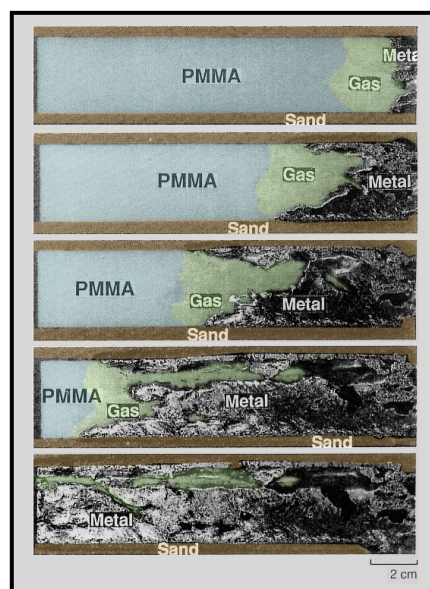
- oproti klasickým technologiím má metoda nižší pořizovací náklady
- snížený počet pracovníků a menší výrobní plochu
- není potřeba využívat zařízení na výrobu jader (jaderníky), forem (klasické formovací linky)
- modely nemusí být opatřeny technologickými úkosi, což zvyšuje přesnost odlitků, je možné předlévat malé, přesné otvory
- odlévání odlitků s tloušťkou od 3 mm a přesností 0,1 mm
- snížení nákladů na obrábění až o 30 %
- při nižší energetické náročnosti vyšší využití tekutého kovu
- velké snížení pracnosti při čistění odlitků [30]

3.5 Vady odlitků a pyrolýza modelových hmot

Při lití dochází ke spalování polystyrenového modelu, čímž zároveň vznikají plyny, které unikají do formy. Mezi hladinou odlévaného kovu a polystyrenovým modelem se vytvoří plynová vrstva. Mezi běžně používané materiály se řadí expandovaný polystyren (EPS) a polymethylakrylát (PMMA). Při použití materiálu EPS je mezi odlévaným kovem a modelem zanedbatelná vrstva vzniklého plynu. (obr. č. 23). Kov je tedy v těsném kontaktu s polystyrenovým modelem. Vzniklé plyny jsou lehce absorbovány do písku bez většího vzniku vad. Zatímco u modelů vyrobených z PMMA materiálu vzniká mezi modelem a postupujícím kovem poměrně velká vrstva plynu, dosahující tloušťky až dvou centimetrů, tento průběh zachycuje obrázek č. 24. Množství vzniklých plynů je tak razantně větší než u využití EPS. [31]



Obr. č. 23: *Postup kovu a vývin plynů při použití EPS [31]*



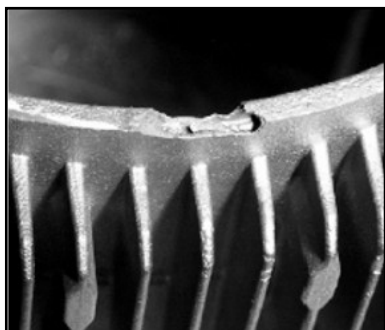
Obr. č. 24: *Postup kovu a vývin plynů při použití PMMA [31]*

Nejčastější vady, které se vyskytují u této metody, jsou zejména povrchové vady, dále pak poréznost a uhlíkové vady. Další vady mohou vznikat nedostatečným zhutněním formy, kov tak pronikne do mezizrnových prostor směsi. Vzhledem ke skutečnosti, kdy kov přesně kopíruje povrch modelu, dochází také ke vzniku vad způsobených nepřesnostmi samotného modelu (odštípnutí apod.).

- **bubliny** – vady se vyskytují v horních částech odlitku nebo na vodorovně orientovaných plochách. Příčinou vad je zbytková voda z nedostatečně vysušeného nátěru.

Při odlévání vodní pára vytváří protitlak a nátěr tak není schopen všechny plyny dostatečně převést do formovací směsi (obr. č. 25).

- **penetrace** – tyto vady se nejčastěji objevují ve spodních částech odlitků nebo na místech, kde je větší tepelné expozice. Indikátorem těchto vad může být také nedokonalý, popraskaný nátěr, či málo zhutněná formovací směs (obr. č. 26).



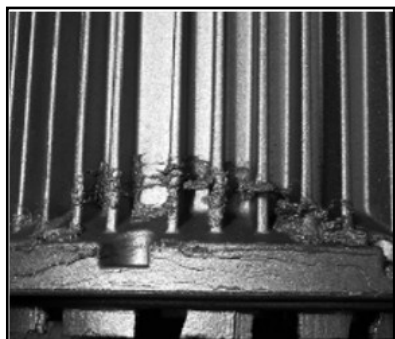
Obr. č. 25: Příklad vady -
bubliny [26]



Obr. č. 26: Příklad vady -
penetrace [26]

- **utržení odlitku** – vady mohou vznikat působením metalostatického tlaku. Pokud je nad modelem příliš malá vrstva formovací směsi, může dojít k odtržení části modelu nebo jeho úplnému vysunutí nad hladinu formovací směsi. Zabránit vzniku těchto vad lze zatěžováním forem a vyšší vrstvou formovacího materiálu nad modelem. V určitých případech je možné využití vakua. (obr. č. 27).

- **řidký povrch** – Tento typ vad vzniká díky vadnému polystyrenu, který je špatně vypěněn. Během aplikace nátěru se nátěr dostane do prázdných prostor mezi kuličky polystyrenu a tím brání kovu ve vyplnění zmíněných prostor (obr. č. 28). [26]



Obr. č. 27: Příklad vady – utržení
odlitku [26]



Obr. č. 28: Příklad vady – řídký
povrch [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

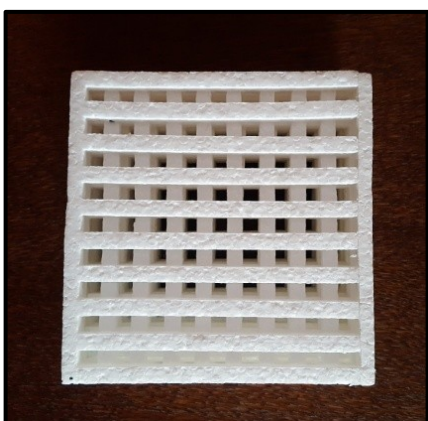
Praktická část této diplomové práce je zaměřena na výrobu a zkoušení mechanických vlastností kovových pěn s pravidelnou strukturou. Při výrobě byla použita metoda Lost Foam, čili lití na spalitelný model. Níže je popsán postup výroby samotného modelu z expandovaného polystyrénu (EPS), proces formování, průběh lití a samotné vyhodnocení provedené tlakové, tahové zkoušky a metalografického rozboru.

1. POSTUP VÝROBY KOVOVÉ PĚNY S PRAVIDELNOU STRUKTUROU

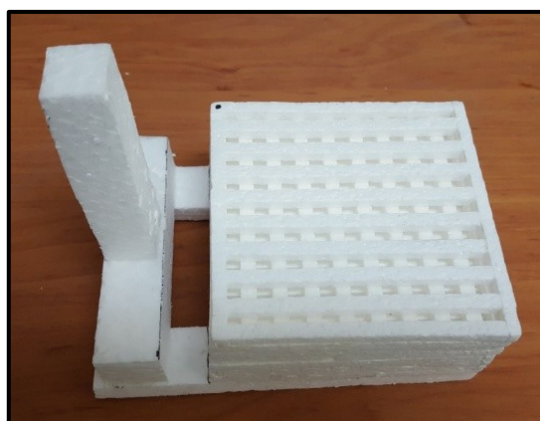
1.1 Výroba modelu

Na výrobu modelu byl použit expandovaný polystyren (EPS) jako vhodný materiál k využití metody Lost Foam a také jako poměrně flexibilní materiál k ruční výrobě modelu. Celkem byly vyrobeny 3 typy modelů, ze kterých se pouze na modelu s označením 2 typ provedla tlaková i tahová zkouška a metalografický rozbor struktury.

- **1 typ modelu** – zde se jednalo o model z navrstvených mřížek, které byly pokládány střídavě na sebe s orientací jednotlivých mříží horizontálně a vodorovně. Jednotlivé vrstvy byly slepovány pomocí oboustranné lepicí pásky. Rozměr jedné vrstvy byl zvolen 110x110x6 mm. Celková velikost modelu při 8 patrech následně činila 110x100x48 mm.



Obr. č. 29: Model z EPS bez vtokové soustavy – typ 1

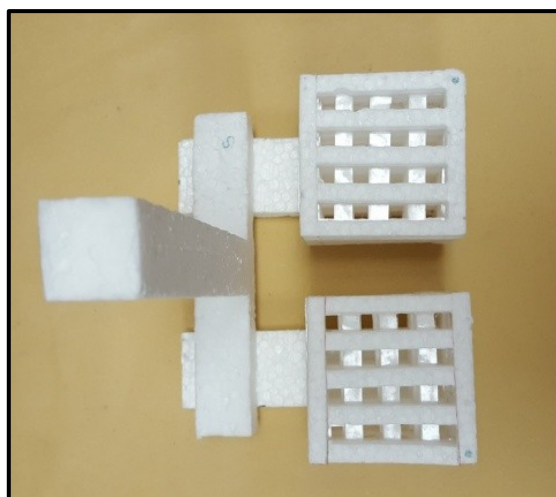


Obr. č. 30: Model z EPS opatřený vtokovou soustavou – typ 1

- **2 typ modelu** – v tomto případě byly upraveny rozměry předešlého modelu, velikost jednotlivé mřížky byla 52x52x6 mm a celkový rozměr modelu byl 52x52x42 mm. Došlo zde také k úbytku jednoho patra, model se skládal pouze ze 7 mřížek. Tímto krokem se docílilo stejné orientace mřížek na k sobě protilehlých stranách, což umožnilo získání přesnějších výsledků tlakové zkoušky. S ohledem na tlakovou zkoušku, byly rozměry zmenšeny oproti původnímu modelu.



Obr. č. 31: Model z EPS bez
vtokové soustavy – typ 2



Obr. č. 32: Model z EPS opatřený
vtokovou soustavou – typ 2

- **3 typ modelu** – tento typ modelu byl vyroben pouze ve čtyřech provedeních. Jednalo se o experimentální zjištění, s jakou úspěšností se odlije odlitek kovové pěny s plnými stěnami ze všech stran. Rozměrově je totožný s modelem typu 2.



Obr. č. 33: Model z EPS bez
vtokové soustavy – typ 3



Obr. č. 34: Model z EPS opatřený
vtokovou soustavou – typ 3

1.1.1 Expandovaný polystyren (EPS)

Polystyren vzniká polymerací styrenu a pentanu, které jsou jeho základními složkami. Zpěňováním perli vznikne v materiálu uzavřená buněčná struktura obsahující velké množství vzduchu. Polystyren je tvořen vzduchem až z 98%, proto je velmi lehký a má výborné tepelně-izolační vlastnosti. EPS je nerozpustný ve vodě, jeho nasákavost je tímto minimální. [32]

1.1.2. Vtoková soustava

Vtoková soustava byla vyrobena ze stejného materiálu jako model, tedy z EPS. Na základě experimentální části v diplomové práci Ing. Lenky Karchové [36], byla zvolena jako nejvhodnější varianta k úplnému zaběhnutí spodní zaústění zářezů. Aby vtoková soustava splnila svůj účel, je zapotřebí, dle platných vzorců, vypočítat rozměry jednotlivých jejích částí. Vzhledem k složitosti modelu byla vtoková soustava, na základě zkušeností, modifikována do následujících rozměrů:

- velikost zářezu: 10 x 30 x 100 mm
- velikost rozváděcího kanálu: 20 x 15 x 115 mm
- velikost vtokového kůlu: 20 x 20 x 100 mm
- využití tekutého kovu:

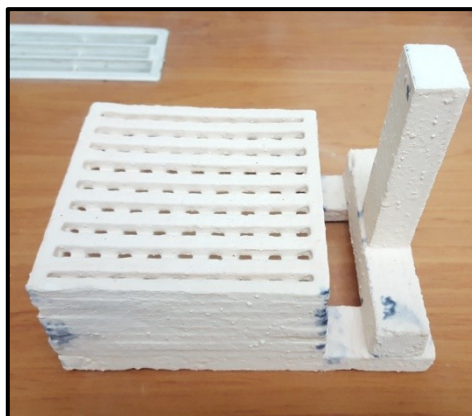
1.2 Vnější ochrana modelu

Aby při lití kovu do formy nemohlo dojít k vadám, např. k penetraci kovu do formy, bylo provedeno opatření povrchové ochrany modelu i vtokové soustavy. Model spolu s vtokovou soustavou byl tedy namáčen v nátěru typu FOUNDRYLAC ZBM/365. Jedná se o vysoce žáruvzdorný nátěr na bázi lihu, využívaný jako náhrada za zirkonové nátěry. Jeho krycí schopnost je velmi dobrá a také má výbornou roztíratelnost štětcem.

Nátěrová hmota byla v sypkém stavu smíchána s technickým lihem a precizně promíchána, až vznikl tekutý nátěr bez hrudek. Na takto připraveném nátěru byla provedena zkouška tekutosti pomocí výtokového pohárku, která by měla podle technické karty dosahovat 18 sekund. Pro složitost a křehkost modelu byla zvolena vyšší tekutost a po měření tedy dosahovala hodnoty 10 s. Model, pokrytý nátěrem, usychal při pokojové teplotě 24 hodin.



Obr. č. 35: *Nátěrová hmota*



Obr. č. 36: *Model opatřený nátěrem*

1.3 Formování modelu

K zaformování modelu byl použit křemenný písek z lokality Grudzeń Las, označován jako GL 21 ($D_{50} = 0,20-0,24$). Tento formovací materiál je vhodný jak pro železné, tak i pro neželezné slitiny. Disponuje výbornou žáruvzdorností (nad $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$) a také vysokou mineralogickou čistotou.

Samotné formování probíhalo zásypem křemenného písku na model včetně vtokové soustavy tak, aby byl dostatečně zasypán až po okraj formy. Následovalo zhuštění formy pomocí vibrací po dobu 3 minut. Vzhledem k pravděpodobnému strhnutí směsi do dutiny formy během lití bylo následně okolí vtokového kůlu zpevněno jednotnou bentonitovou směsí. Aby nedocházelo ke ztrátám kovu při lití, byly formy opatřeny vtokovými jamkami, vyrobeny speciálně pro účely tohoto experimentu. Tyto jamky byly zhotoveny z modelové směsi Bentomix T – Oil Bonded Sand.



Obr. č. 37: *Hotová forma s jedním kusem modelu*



Obr. č. 38: *Hotová forma se speciální vtokovou jamkou*

1.4. Odlévání

Jednotlivé lití probíhalo v prostorách školy VŠB-TUO v laboratořích katedry metalurgie a slévárenství. Odlévaným materiálem byla slitina hliníku AlSi11, která je vhodná pro výrobu tenkostěnných i tvarově složitých odlitků. Slitina byla tavena v elektrické odporové peci (LAC 80/13). Po vyjmutí kelímku s nataveným kovem se provedlo odstranění oxidů z povrchu taveniny a termočlánkem byla změřena teplota kovu. Pro lepší zabíhavost slitiny byly voleny vyšší teploty lití okolo 750 °C.



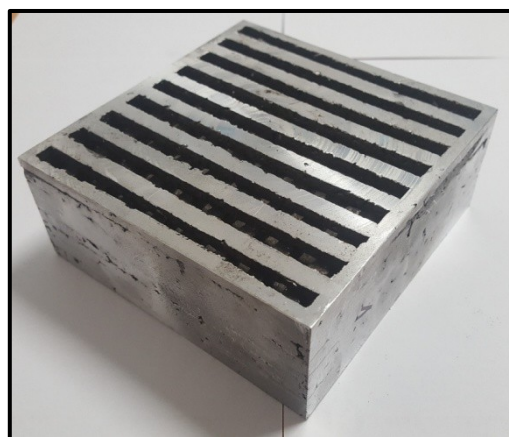
Obr. č. 39: Proces odlévání vzorků

1.5. Čištění odlitku a dokončovací práce

Po vyjmutí již chladného odlitku z formy bylo potřeba zbavit odlitek zbytku spáleného ochranného nátěru. Pomocí ocelového kartáče a poklepem na samotný odlitek byl tento očištěn. Následovalo odřezání vtokové soustavy a strojním obráběním bylo docíleno hladkého povrchu.



Obr. č. 40: Očištěný odlitek od zbytků nátěru s vtokovou soustavou



Obr. č. 41: Obrobený odlitek kovové pěny bez vtokové soustavy



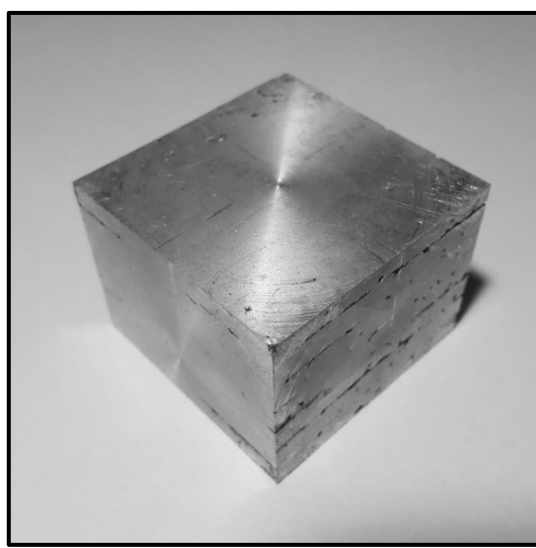
Obr. č. 42: *Očištěný odlitek od zbytků nátěru s vtokovou soustavou*



Obr. č. 43: *Obrobený odlitek kovové pěny bez vtokové soustavy*



Obr. č. 44: *Očištěný odlitek s plnou stěnou bez vtokové soustavy*



Obr. č. 45: *Obrobený odlitek kovové pěny s plnou stěnou*

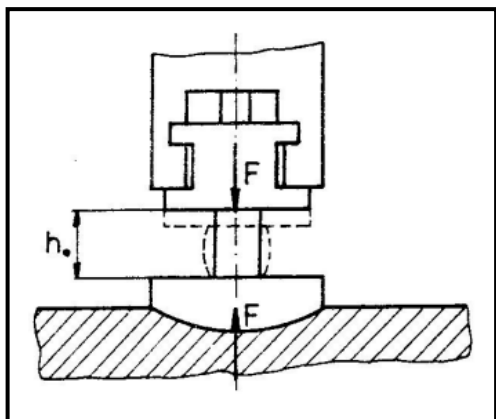
2. MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Vzhledem k tomu, že jsou materiály při svém používání namáhány, je zapotřebí, aby jejich mechanické vlastnosti těmto vlivům odolávaly. Jak moc jsou jednotlivé materiály odolné, lze zjistit pomocí mechanických zkoušek. Tyto zkoušky hodnotí chování materiálů při působení sil a jsou nedílnou součástí výrobního provozu pro kontrolu jakosti vyrobených odlitků. Jedná se o jedny z nejrozšířenějších možných způsobů zkoušení materiálů. Základní rozdělení mechanických zkoušek je ve směru působení sil na zkoušené těleso.

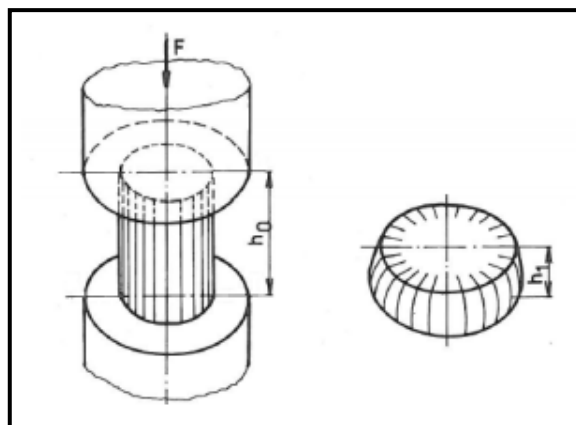
- **statické zkoušky:** jedná se o zkoušky, kdy je těleso namáháno v klidové poloze a pozvolným působením sil v krátkém čase (tahová zkouška, tlaková zkouška, zkouška ohybem, zkouška krutem).
- **dynamické zkoušky:** zde se jedná o zkoušky, kdy je na těleso působeno silou rázově a působí se krátkou dobu nebo v cyklických opakováních (rázová zkouška, únavová zkouška).

2.1 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška patří mezi statické mechanické zkoušky. Jedná se o zkoušku, při které se hodnotí analogické vlastnosti jako u tahové zkoušky. Používá se stejný trhací stroj, ovšem jeho čelisti se musí nastavit na tlakovou zkoušku, čímž se pohybují opačným směrem oproti tahové zkoušce. Tyto čelisti se nazývají reverzory. Zkouška má uplatnění především u křehkých materiálů (šedá litina, keramické materiály, stavební materiály apod.), své opodstatnění však najde i u tvárných materiálů. Zkoušený vzorek je rovnoměrně zatěžován působící silou, která postupně roste, dokud na vzorku nejsou zpozorovány první trhliny nebo nedojde k úplnému porušení. V případě zkoušení křehkého materiálu (např. šedé litiny) dochází k prasknutí, na rozdíl od tvárných materiálů, kdy se zkušební vzorek deformuje do podoby soudku. Deformace vzorku probíhá v horizontálním směru (materiál se rozšiřuje do stran), tak i ve vertikálním směru (vzorek mění svou výšku – zmenšuje se). Výsledným grafickým výstupem tlakové zkoušky je křivka deformace v závislosti na napětí. [33, 34]



Obr. č. 46: *Schéma zatěžování
při tlakové zkoušce [33]*



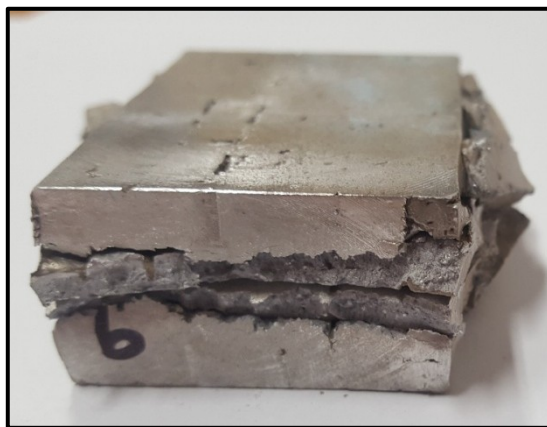
Obr. č. 47: *Příklad vzorku před
a po vykonání tlakové zkoušky [34]*

2.1.1 Vlastní měření

Tlakové zkoušky byly podrobeny vzorky 2 typu, čili vzorky o rozměrech 52 x 52 x 42 mm. Celkem bylo testováno 20 kusů vzorků kovových pěn s pravidelnou strukturou. Zkouška byla uskutečněna na odborném pracovišti společnosti VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o., člen skupiny VÍTKOVICE MACHINERY GROUP. Zkoušky tlakem byly prováděny na stroji Zwick Z600, při rychlosti posuvu 10 mm/min.



Obr. č. 48: *Testovaný vzorek kovové pěny
po tlakové zkoušce*



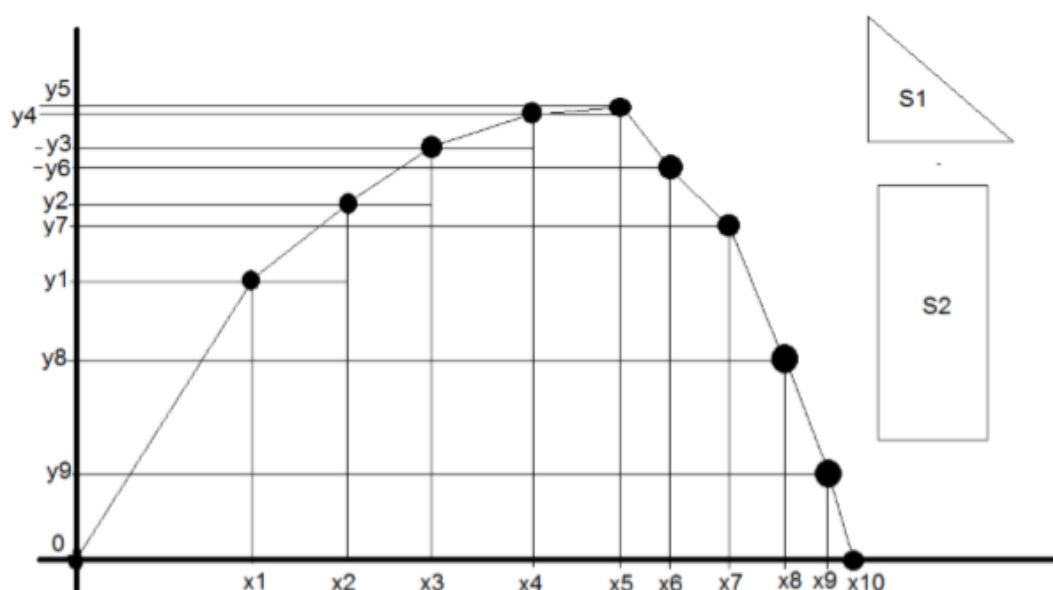
Obr. č. 49: *Testovaný vzorek kovové pěny
po tlakové zkoušce*

Na testovaných odlitcích, vyrobených metodou Lost – Foam, bylo sledováno, jak se materiál chová při konstantním zatěžování, zda zde dojde k rozdílnému stavu výsledných deformačních křivek nebo naopak. Hodnoty získané z tlakové zkoušky jsou shrnuty v tabulce č 1.

Slitina		AlSi11				
Typ zařízení		Zwick Z600				
Rychlost posuvu [mm/min]		10				
Číslo vzorku	Teplota lití [°C]	Doba lití [s]	Velikost [mm]	Max. pevnost v tlaku Fmax [kN]	Max. deformace [mm]	Deformační práce W [J]
1	793	9,8	49,7x49,3x38,3	253,94	29,10	2962,07
2	793	9,8	49,7x49,3x37,6	283,90	30,01	3426,03
3	792	10,5	50,1x51,0x38,4	149,68	14,76	1504,31
4	792	10,5	50,3x50,3x38,5	288,11	29,10	3362,80
5	792	9,2	49,3x49,6x38,3	276,03	28,90	3026,60
6	792	9,2	47,9x49,2x37,0	274,32	28,99	3342,76
7	807	11,0	49,8x49,0x38,0	277,20	30,59	2830,97
8	807	11,0	49,7x48,8x38,4	353,95	31,66	3340,07
9	795	10,0	48,8x48,0x38,4	267,76	29,12	3010,19
10	795	10,0	49,3x48,3x38,1	268,31	28,38	2535,46
11	795	10,2	48,5x48,5x38,9	293,35	28,24	3582,79
12	795	10,2	48,6x48,7x38,6	270,50	28,02	2964,79
13	807	9,0	48,0x48,8x38,4	282,89	28,81	3871,61
14	807	9,0	49,7x49,0x37,9	265,80	28,09	2950,92
15	807	10,1	48,6x48,3x38,3	265,21	29,44	3336,00
16	807	10,1	49,4x48,3x38,6	324,53	29,88	3485,78
17	808	9,0	48,0x49,0x37,9	274,63	27,71	3112,49
18	808	9,0	49,5x49,1x38,3	259,02	27,72	3184,68
19	808	9,8	48,5x49,5x38,2	269,84	27,69	3205,08
20	808	9,8	47,7x48,7x38,3	261,75	28,46	3047,29

Tab. č. 1: Výsledné hodnoty z tlakové zkoušky

Pomocí výpočtů obsahů trojúhelníků a kvádrů u křivky napětí – deformace (plocha pod křivkou), byly získány hodnoty deformační práce [J]. Výpočty byly prováděny v programu Microsoft Office Excel na základě níže uvedeného principu (Obr. č. 50).



Obr. č. 50: Křivka napětí – deformace, výpočet plochy pod křivkou

Celková plocha od 0 po x_5 je součet obsahů S mezi $(0, x_1)$, (x_1, x_2) , až (x_4, x_5) . Tato plocha pod křivou představuje deformační práci [J].

$$S = S_1 + S_2$$

- **Plocha S_1** – jedná se o plochu, která je dána součinem rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot síly [N] a rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot stlačení [mm] v absolutní hodnotě.

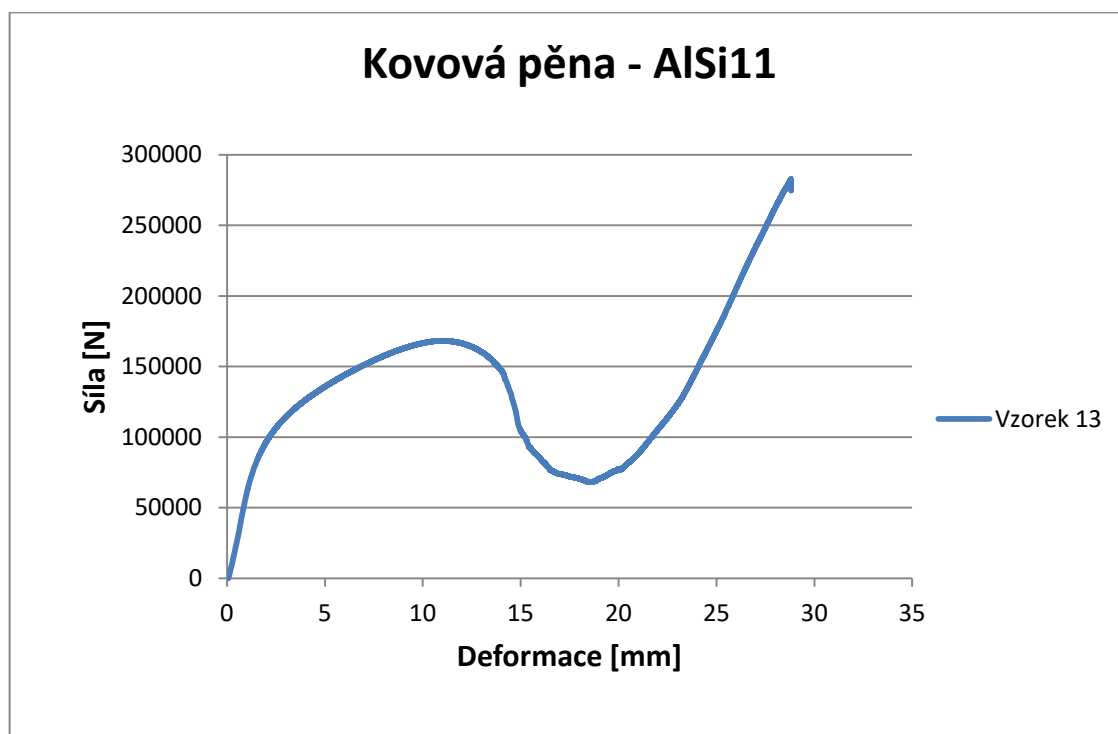
- **Plocha S_2** – tato plocha je daná součinem předcházející hodnoty síly [N] a rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot stlačení [mm].

- **Plocha S** – je to plocha mezi dvěma po sobě jdoucími body.

Z výsledků tlakové zkoušky je zřejmé, že vzorek č. 8 dosáhl nejvyšší pevnosti v tlaku (353,95 kN) a zároveň u něj došlo k nejvyšší deformaci (31,66 mm). Nejvyšší hodnoty deformační práce dosáhl vzorek č. 13 (3871,61 J), jeho pevnost v tlaku byla mírně nad průměrem všech vzorků. Průměr maximální pevnosti v tlaku testovaných vzorků činí 272,50 kN. Deformační křivky jednotlivých testovaných vzorků měly podobný trend, z tohoto důvodu jsou níže uvedeny grafy pouze vzorků č. 8 a č. 13. U vzorku č. 10 dosahuje deformační práce, oproti ostatním vzorkům, nízké hodnoty. Možnou příčinou je nedokonalé slepení modelu a následné zatečení nátěru mezi jednotlivé mřížky polystyrenu a narušení tak její soudružnosti. U vzorku č. 3 s velkou pravděpodobností došlo k nedokonalému odlití vnitřní struktury, což mělo za následek oslabenou konstrukci celého odlitku. Výsledná hodnota pevnosti v tlaku i deformační síly byla oproti zdravým odlitkům podstatně nižší.



Graf. č. 1: *Křivka deformace tlakové zkoušky – vzorek č. 8*



Graf. č. 2: *Křivka deformace tlakové zkoušky – vzorek č. 13*

2.2 Tahová zkouška

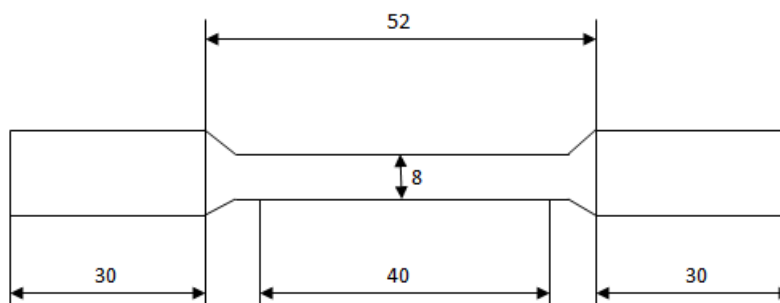
Tahová zkouška patří mezi nejzákladnější a nejrozšířenější zkoušky. Principem této zkoušky je přetržení zkušební tyče a následné vyhodnocení deformačních (A , Z) a napětíových (R_m , R_e) charakteristik. Mezi tyto základní mechanické vlastnosti patří tyto čtyři:

- **Mez pevnosti v tahu** (R_m [MPa]) – jde o smluvní napětí, které odpovídá největšímu zatížení těsně před porušením tyče
- **Mez kluzu v tahu** (R_e [MPa]) – charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-pružnou oblastí zatěžovací křivky
- **Tažnost** (A [%]) – jedná se o poměrnou podélnou trvalou deformaci
- **Kontrakce** (Z [%]) – je největší trvalé zúžení průměru, odměřené po přetržení v místě lomu

Zkušební tyče jsou buďto kruhového nebo obdélníkového průřezu a jsou pevně upnuté do čelistí trhacího stroje. Zkušební tyč je zatěžována postupně vzrůstající silou až do přetržení. Grafickým výstupem zkoušky je pracovní diagram závislosti poměrného prodloužení na normálové napětí. [33]

2.2.1 Vlastní měření

Tahová zkouška byla prováděna na 12 zkušebních vzorcích. Vzorky byly odebrány z vtokových soustav odlévaných vzorků, kdy se jednalo o rozváděcí kanál. Po hrubém odřezání ostatních částí byl vzorek obroben na normovaný rozměr podle ČSN. Obrábění bylo prováděno v prostorách dílen VŠB – TUO. Zkušební tyč byla kruhového průřezu o velikostech zobrazující obr. č. 51.



Obr. č. 51: Rozměry zkušební tyče pro tahovou zkoušku

Zkoušení bylo prováděno v prostorách laboratoří katedry materiálového inženýrství VŠB – TUO. Měření bylo realizováno na stroji Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine LFV 100 kN při rychlosti zatěžování 2mm/min.



Obr. č. 52: Zkušební tyče před namáháním



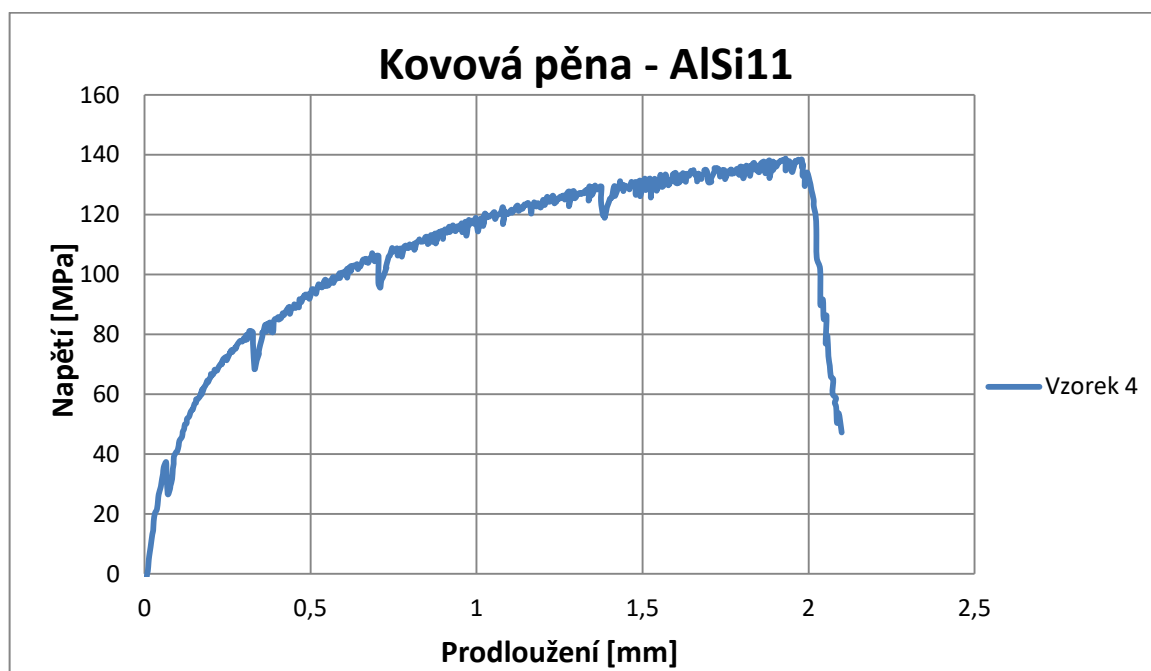
Obr. č. 53: Zkušební tyče po přetrhnutí

Výsledky z tahové zkoušky byly zpracovány v programu Microsoft Office Excel na základě získaných křivek závislosti napětí na prodloužení. Přehled výsledků zobrazuje tabulka č. 2:

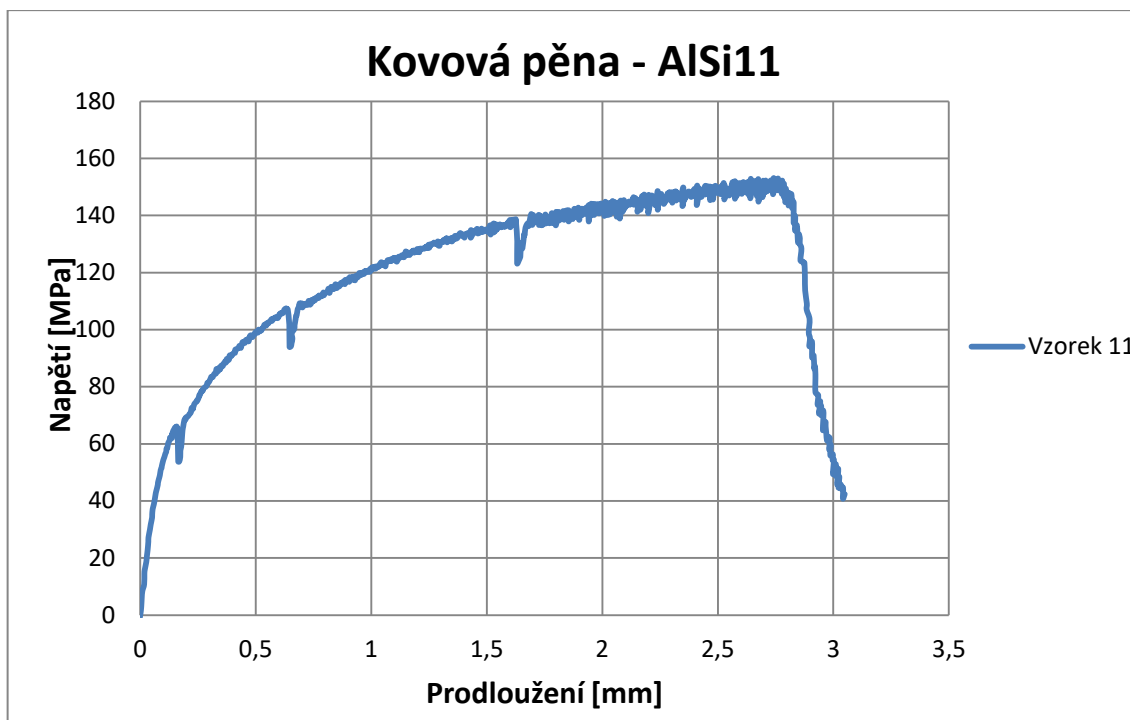
Slitina			AlSi11		
Typ zařízení			Multipurpose Servohydraulic		
Rychlost zatěžování [mm/min]			2		
Číslo vzorku	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Rp [MPa]	Fm [kN]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
1	152,4	74,4	7,91	4,72	3,4
2	147,4	72,1	7,63	4,74	5,5
3	79,9	59,2	4,2	2,50	4,2
4	138,7	68,0	7,08	3,89	3,3
5	150,5	68,6	7,83	5,02	4,5
6	149,0	70,9	7,68	5,50	4,0
7	148,5	75,2	7,62	4,90	5,1
8	142,7	74,7	7,24	4,12	4,7
9	145,5	71,3	7,54	4,98	5,5
10	150,3	69,0	7,71	5,06	5,4
11	153,2	69,4	7,89	5,76	4,9
12	147,8	68,3	7,47	5,15	4,2

Tab. č. 2: Výsledky tahové zkoušky zpracované do tabulky

Z výsledků tahové zkoušky lze pozorovat, že u vzorku č. 3 došlo k chybě v měření. U ostatních vzorků vycházely výsledky v podobném rozpětí. Největší pevnost v tahu vykázal vzorek č. 11, který zároveň disponoval nejvyšší tažností ze všech zkoušených vzorků. Naopak nejnižší pevnost v tahu dosáhl vzorek č. 4, stejně tak disponoval nejnižší meze kluzu a tažností. Při hodnocení meze kluzu $R_{p0,2}$ lze říci, že nejvyšší hodnoty docílil vzorek č. 7.



Graf. č. 3: Křivka deformace tahové zkoušky – vzorek č. 4



Graf. č. 4: Křivka deformace tahové zkoušky – vzorek č. 11

2.3 Metalografická zkouška

Díky metalografii jsme schopni posoudit makrostrukturu i mikrostrukturu materiálu. Zviditelnění struktury se provádí pomocí světelného nebo elektronového mikroskopu. Metalografie je jedním ze zásadních pomocníků u výrobního procesu. Díky metalografii lze sledovat a kontrolovat vlastnosti materiálu během samotného procesu v mezikrocích, či klasifikovat množství skrytých vad a zjišťovat jejich příčiny. Celý proces metalografické zkoušky probíhá v těchto základních krocích: [35]

- odběr vzorku
- preparace vzorku (zalévání) – není nutné u každého vzorku
- broušení vzorku
- leštění vzorku
- leptání vzorku

2.3.1 Odběr vzorku

Odběr vzorku se nejčastěji provádí odřezáním, nesmí však dojít k tepelnému ovlivnění struktury daného materiálu. Vzorky by neměly být příliš velké, aby se s nimi dalo snadněji manipulovat.

- **Preparace vzorků** - menší vzorky zpravidla o rozměru jednoho cm^2 se mohou zalít do pryskyřicové hmoty, čímž vznikne tzv. „bábovička“. Při ruční manipulaci se takovéto vzorky snadněji drží a při poloautomatické přípravě lze vzorky díky jednotnému tvaru vložit do stroje. Preparaci lze provádět vícero způsoby:

- **zalévání za studena**: vzorek umístěný do formičky se přelije důkladně promíchanou epoxidovou pryskyřicí smíchanou s těkavou látkou DENTACRYL. Následné tuhnutí probíhá příštích 24 hodin.

- **zalisování za tepla**: tento způsob se provádí v „tlakové komoře“, kam se umístí vzorek. Přidá se prášek ze speciálního polymeru a za zvýšených teplot se zpracovává. Na hmotu působí zvýšená teplota a zároveň i zvýšený tlak. Polymer se roztopí a obklopí vzorek. Tento způsob rapidně zkracuje dobu výroby až na 10 minut, nelze jej však využít u materiálů, které by mohlo zvýšení teploty a tlaku ovlivnit strukturu. [35]

2.3.2 Broušení vzorku

Broušení vzorku se provádí nejčastěji za mokra na brusných papírech různých zrnitostí s posloupností od nejhrubšího k nejjemnějšímu brusnému papíru. Při přechodu z jednoho brusného papíru na druhý je zapotřebí vorek otočit o 90° , aby byl nyní kolmo k původnímu směru broušení. Cílem broušení je získání rovného povrchu s co nejmenším poškozením. Během broušení se mohou např. z ředin uvolňovat částice, které stále dokola poškozují broušený povrch. Broušení lze mechanizovat pomocí brusných strojů nebo lze provádět ručně. Rychlost brusných kotoučů se běžně pohybuje v obsahu 30 – 300 otáček za minutu. Jako chladicí média jsou využívány řady smáčedel na vodní nebo etanolové bázi aj.

- **Beilbyho vrstva** – během broušení i leštění dochází v jisté míře také k tváření onoho materiálu. Následně dochází k vzniku Beilbyho vrstvy nebo také B-vrstvy. Jedná se o vrstvu tvářeného materiálu, která mnohdy zcela znemožní jakékoli další zkoumání struktury.

Velikost B-vrstvy závisí na síle broušení a leštění, zejména u broušení za sucha. Obecně platí, že čím víc na vzorek působí tlak a rychlost, tím víc se vzorek zahřívá, čili tváří a vzniká silnější vrstva. Tlak i rychlost by tak měly být přizpůsobeny zvolené technologii. K odstranění B-vrstvy při mokřém broušení se využívá smáčidel a jejich intenzivního ochlazování. U porézních materiálů ulpívají broušené částice uvnitř pórů, zbavit materiál těchto částic lze například v ultrazvukové čističce. [35]

2.3.3 Leštění vzorku

Leštění vzorků se provádí mechanicky, elektrolyticky nebo chemicky. Účelem leštění je docílit co nejjemnějšího povrchu a odstranit rýhy, způsobené broušením v předešlém kroku.

- **mechanické leštění** – jedná se o způsob, který má nejširší využití a je zároveň nejjednodušší variantou způsobu leštění. Proces leštění je principiálně stejný jako u broušení. Jedná se o vynaložení určitého tlaku na vzorek, který se pohybuje po leštícím, rotujícím kotouči. Oproti broušení je přitlačná síla slabší a rychlost otáček dosahuje maximálně 150 otáček za minutu. Jako materiál pro leštící kotouče se používají nejčastěji textilní sukna nebo méně často speciální kovové podložky. Leštícími prostředky jsou nejběžněji Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CeO_2 a diamant (nejdražší). Po vyleštění je již možno sledovat strukturu materiálu pomocí optického mikroskopu. [35]

2.3.4 Leptání vzorku

Pro podrobnější zkoumání mikrostruktury je potřeba vzorek podrobit leptání, kdy dojde k většímu zviditelnění struktury. Leptání odstraní zbytky vzniklé B-vrstvy. Vzorek se naleptá ponořením do leptacího činidla o správné koncentraci a po vymezenou dobu se nechá ponořený. Leptadlo leptá na povrchu nejdříve energeticky náročná místa, jako jsou hranice zrn, rozhraní fází apod. Základní způsoby leptání: [35]

- leptání na hranice zrna
- plošné leptání
- selektivní leptání

2.3.5. Vlastní měření

K pozorování struktury bylo použito 12 vzorků, které byly odebrány z vtokových soustav odlévaných vzorků. Z každé vtokové soustavy byl odebrán jeden vzorek z místa, který původně soužil jako rozváděcí kanál. Celá zkouška probíhala v prostorách katedry materiálového inženýrství VŠB – TUO.

Broušení vzorků bylo prováděno na brusných papírech vzestupně od nejhrubšího po nejjemnější (600 zrn/cm², 800 zrn/cm², 1200 zrn/cm², 1600 zrn/cm²). Dále se přistouplo k leštění na leštícím textilním kotouči, zde bylo jako leštidlo použito oxidu hlinitého neboli „hlínky“ v podobě hustšího roztoku. Tento roztok se průběžně doléval na leštící kotouč. Pro dokonalejší vzhled pohledové plochy byly vzorky doleštěny na magnetické leštičce, která využívá magnetické působení v kombinaci s odstředivou silou, což zajišťuje intenzivnější leštění. Použité leštící plátna jsou speciálně určená pro tuto technologii.



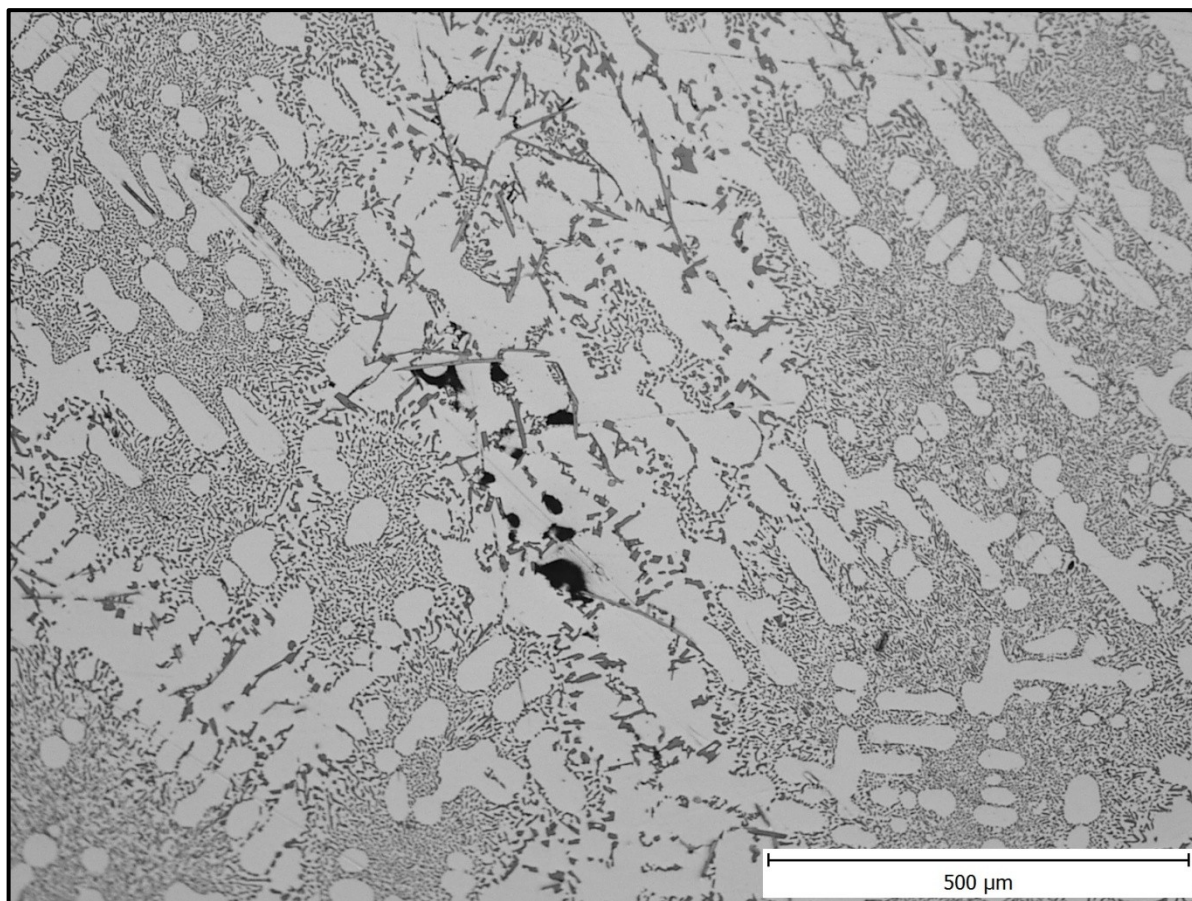
Obr. č. 54: *Vzorky pro metalografickou zkoušku (vlevo – vzorek před, vpravo – vyleštěný vzorek)*



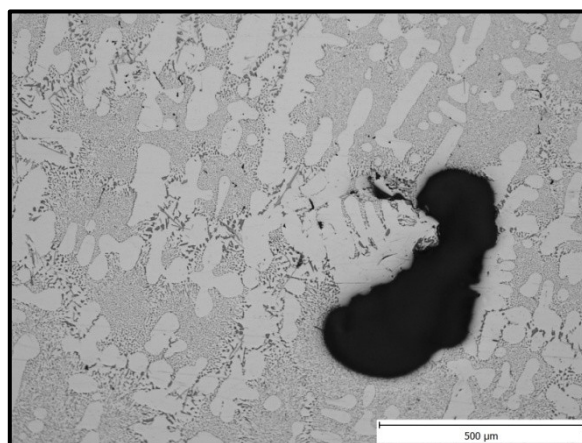
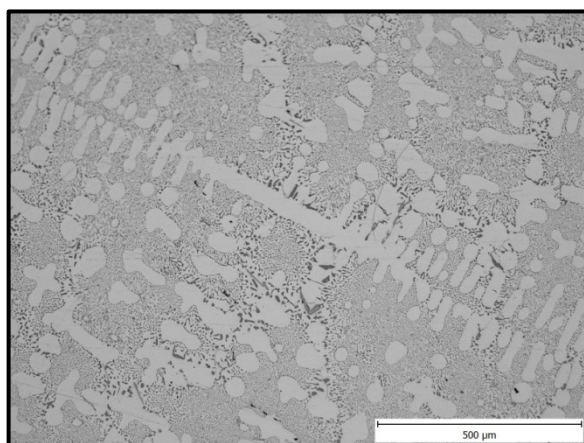
Obr. č. 55: *Vzorky podrobené metalografické zkoušce*

Pozorování struktury probíhalo na inverzním metalografickém mikroskopu OLYMPUS GX51 s následným přenosem dat do počítače, kde byl zpracován grafický výstup.

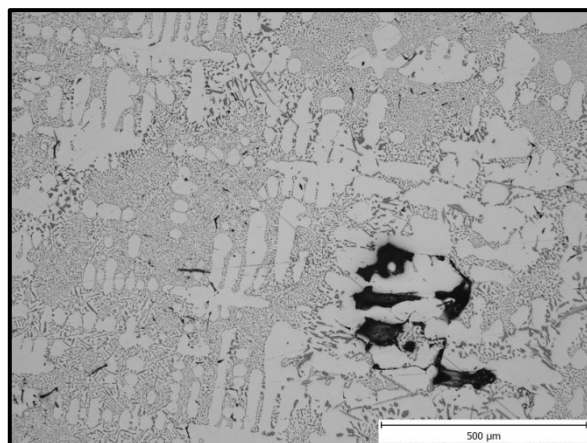
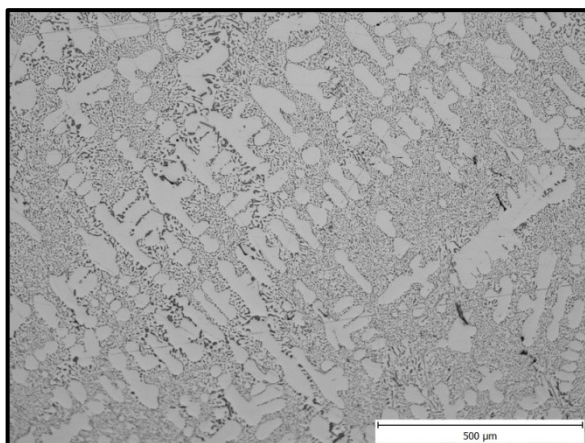
Odlévána byla slitina AlSi11 metodou Lost Foam, jedná se o podeutektickou slitinu (obsah Si kolem 11%) s výbornou zabíhavostí. Struktura se skládá z tuhého roztoku α a eutektika. Ve struktuře jsou viditelné dendrity a plynové vady, způsobené odpařováním polystyrenu. Rozdíly struktury mezi jednotlivými vzorky se příliš nelišily, z toho důvodu je zde uveden výběr pouze čtyř struktur měřených vzorků (Obr. č. 56, 57, 58, 59). [37]



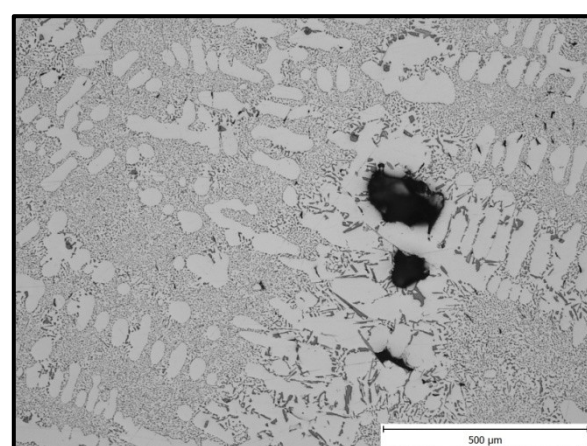
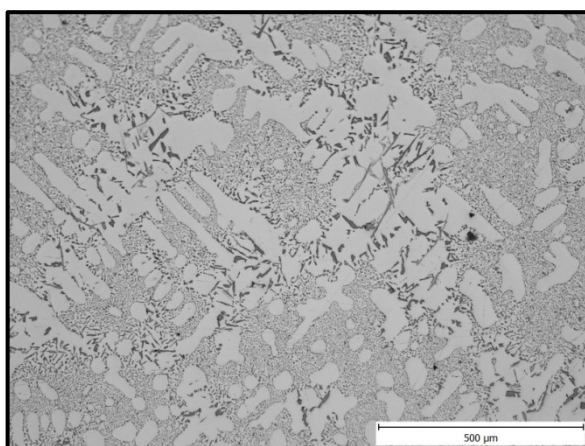
Obr. č. 56: *Struktura vzorku č. 2 při zvětšení 100x*



Obr. č. 57: *Struktura vzorku č. 3 při zvětšení 100x (vlevo – dendritická struktura, vpravo – plynová vada)*



Obr. č. 58: *Struktura vzorku č. 4 při zvětšení 100x (vlevo – dendritická struktura, vpravo – plynová vada)*



Obr. č. 59: *Struktura vzorku č. 9 při zvětšení 100x (vlevo – dendritická struktura, vpravo – plynová vada)*

Pro přehlednost jsou v níže uvedené tabulce zaznamenány vzorky, jejichž struktury jsou v této práci uvedeny.

Číslo vzorku	Slitina	Teplota lití [°C]	Doba lití [s]	Místo odběru vzorku
2	AlSi11	792	10,5	zářez vtokové soustavy
3		792	9,2	
4		807	11	
9		803	9	

Tab. č. 3: *Přehled vzorků*

Závěr

Teoretická část této diplomové práce byla zaměřena na porézní materiály – kovové pěny. Pro jejich kladné vlastnosti, jako například nízká hmotnost, schopnost tlumit nárazy, nehořlavost nebo schopnost absorbovat zvuk, mají kovové pěny široké uplatnění. Využití porézních materiálů lze nalézt v automobilovém průmyslu, letecké i vojenské dopravě, stavebnictví nebo jako průmyslové filtry, výměníky tepla aj. V této práci je kladen důraz především na schopnost tlumit nárazy.

V první části práce jsou blíže popsány oblasti využití kovových pěn. Následuje přiblížení slévarenských metod výroby těchto pěn. Dále je v teoretické části popsána metoda Lost - Foam.

V praktické části práce byla hodnocena výroba vzorků pomocí metody Lost - Foam. Výroba těchto vzorků byla uskutečněna v prostorách katedry metalurgie a slévárenství VŠB – TUO. Odlévanou slitinou byla hliníková slitina AlSi11, která se ukázala jako vhodnou slitinou pro tuto aplikaci. Při výrobě vzorků byla navržena vlastní geometrie s pravidelnou vnitřní strukturou a pevnou stěnou ze čtyř stran. Následně byla úspěšně ověřena technologie Lost – Foam a výsledné odlitky nevykazovaly vizuální vady. Celkově byly odlity tři typy vzorků. U prvního typu se zjistilo, že ačkoliv byly odlitky vyrobeny bez vad, díky své velikosti nebyly vhodné pro další zkoušení na tlakovém stroji. Pro druhý typ modelu byl zvolen rozměr 52 x 52 x 42 mm. Na těchto typech vzorků byly provedeny tlakové zkoušky. Průměrná hodnota maximální pevnosti v tlaku byla 272,50 kN. Jednotlivé hodnoty deformační práce byly zjištěny na základě výpočtů obsahů celkové plochy pod jednotlivými deformačními křivkami. Průměrná hodnota deformační práce činila 3150,38 J. Posledním testovaným typem odlitku byl odlitek s plnou stěnou a pravidelnou vnitřní strukturou. Na těchto vzorcích došlo k ověření vnitřní celistvosti odlitku pomocí destruktivní metody. Vnitřní struktura odlitku vykazovala značné necelistvosti, proto doporučuji další zkoumání tohoto výrobního postupu. V další fázi byla provedena tahová zkouška na dvanácti vzorcích. Ze získaných výsledků tahových zkoušek vyplývá, že dosažené hodnoty vykazují podobný trend a průměrná hodnota meze pevnosti dosáhla 147,8 MPa a tažnosti 4,9 %. Další skupina dvanácti vzorků byla podrobena metalografické zkoušce. Vzorky byly vystaveny broušení, leštění a následnému zkoumání pod inverzním metalografickým mikroskopem. Na zkoumaných vzorcích lze pozorovat jednotlivé dendrity i vzniklé plynové vady, způsobené spalováním polystyrenového modelu. Vzhledem k rovnoměrnému rozložení bublin

ve struktuře můžeme hodnotit vady jako akceptovatelné. Hodnocení navržených vzorků uzavírám jako dostatečně průkazné a pro další výzkum doporučuji reálnou aplikaci, případně výrobu rozměrnějších odlitků kovových pěn.

Použitá literatura

- [1] BANHART, J. – ASHBY, M.F. – FLECK, N.A. *Metal Foams and Porous Metal Structures*. Proceedings of the 1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam'99), Bremen (Germany), 14.-16. June 1999, 420 pages
- [2] bone | Definition, Anatomy, & Composition - Chemical composition and physical properties | Britannica.com. *Encyclopedia Britannica* | *Britannica.com* [online]. Copyright ©2018 Encyclop [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/bone-anatomy/Chemical-composition-and-physical-properties>
- [3] Metal Foam | Foam | Metals. *Scribd - Read books, audiobooks, and more* [online]. Copyright © 2018 Scribd Inc. [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/presentation/67448227/Metal-Foam>
- [4] GIBSON, L. J., ASHBY, M. F. *Cellular solids – Structures and properties*. Cambridge university press, 1997. 515 s. ISBN: 0-521-49560-1.
- [5] Metal foam • Materia. *Materia • Materia: global network in the area of innovative materials* [online]. Copyright © 1998 [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://materia.nl/material/metal-foam/>
- [6] GARCÍA-MORENO, F. *Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production*. *Materials*. 2016, 9, 85. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/2/85/htm#B84-materials-09-00085>
- [7] Alulight • Materia. *Materia • Materia: global network in the area of innovative materials* [online]. Copyright © 1998 [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://materia.nl/material/alulight/>
- [8] Foams? Yes, metallic - Metal Working World Magazine. *Metal Working World Magazine* - [online]. Copyright © 2018 All Rights Reserved [cit. 19.04.2018]. Dostupné z: <http://www.metalworkingworldmagazine.com/foams-yes-metallic/>
- [9] Titan Spine's Rough Technology Reaches Smooth Milestones | Orthopedics This Week. *Orthopedics This Week* [online]. Dostupné z: <https://ryortho.com/breaking/titan-spines-rough-technology-reaches-smooth-milestones/>

- [10] waaaat? | OMA *uses coloured mirrors and aluminium foam for Repossi Vendôme store interior* | Design. [online]. Copyright © 2018 WELOVEAD [cit. 21.04.2018]. Dostupné z: <http://waaaat.welovead.com/en/top/detail/b84wkqxxj.html>
- [11] <http://www.globalsources.com/si/AS/Jiujiang-Beihua/6008850209290/pdt/Aluminum-foam-panel/1126151764.htm>
- [12] Pressebericht db, Anenhütte, Blatten, Schweiz . *POHL Fassaden* [online]. Dostupné z: <https://www.pohl-facades.com/unternehmen/news-presse/pressebericht-db-anenhuette-blatten-schweiz/>
- [13] metalfoam: AFS®-Platten. *metalfoam: metalfoam* [online]. Dostupné z: <http://metalfoam.de/afs-platten/>
- [14] Heat exchangers - exxentis I porous aluminium I open-cell complete permeable metal. *exxentis I porous aluminium I open-cell complete permeable metal* - [online]. Copyright © 2015 Exxentis Ltd, Switzerland [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <http://www.exxentis.co.uk/porous-aluminium-applications/heat-exchangers/>
- [15] China American Interior Design Materials Aluminum Foam Plates - China American Interior Design, American Interior Design Materials Aluminum Foam. *China Aluminum Coil manufacturer, Aluminum Sheet, Aluminum Strip supplier - Aluminum King Company Limited* [online]. Copyright © 1998 [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://alumking.en.made-in-china.com/product/xChnsUKcXzWH/China-American-Interior-Design-Materials-Aluminum-Foam-Plates.html>
- [16] File:Metal foam Coffee table.jpg - *Wikimedia Commons*. [online]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal_foam_Coffee_table.jpg
- [17] DRENCHÉV, L. et al. *Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity*. Materials Science and Technology. 2006, Vol. 22, No 10, pp. 1135-1146.
- [18] KROUPOVÁ, I. *Vlastnosti a použití litých kovových pěn*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. VŠB TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství.

- [19] MATOUŠEK, T.: Foams pore size estimation and their acoustic properties [online]. Zlín, 2009. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7956/matousek_2009_dp.pdf?sequence=1
- [20] KROUPOVÁ, Ivana, Petr LICHÝ, Filip RADKOVSKÝ, Jaroslav BEŇO, Vlasta BEDNÁŘOVÁ a Ivo LÁNA. Optimization of the annealing of plaster moulds for the manufacture of metallic foams with an irregular cell structure. *Materials and technology*. 2015, 527–530. DOI: 10.17222/mit.2014.132. ISSN 1580-2949.
- [21] Lattice Block Material Components and Structures in Future Army Vehicles - Jamcorp. - SBIR Source. *SBIR Source* [online]. Copyright © SBIR Source 2018. All rights reserved. [cit. 13.04.2018]. Dostupné z: <https://sbirsource.com/sbir/awards/11810-lattice-block-material-components-and-structures-in-future-army-vehicles>
- [22] Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. *Home | Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. Copyright © 2018 The Royal Society [cit. 19.04.2018]. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1838/31.figures-only?intcmp=trendmd>
- [23] MACÁŠEK, Igor. Slévárenská technologie III. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1972.
- [24] KIMURA GROUP. History of the Full Mold Casting Process. [online] 2017 Dostupný z WWW: <http://www.kimuragrp.co.jp/English/casting/index2.html>
- [25] RADKOVSKÝ, F., KROUPOVÁ, I., LICHÝ, P., BEDNÁŘOVÁ, V. *Optimalizace kompletace polystyrenových modelů pro technologii lost foam v laboratorních podmínkách*. Slévárenství, 2014, roč. LXII, č. 11-12, s. 424-426, ISSN 0037-6825.
- [26] LICHÝ, Petr; ELBEL, Tomáš. *Speciální metody výroby odlitků*. Studijní opora. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava, 2008.
- [27] BARTOŠ, F., *Technologie zhotovení odlitků "na hotovo"*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

- [28] ACH Foam Technologies - Leader in Expanded Polystyrene (EPS) Manufacturing - Lost Foam Casting Process. [online]. Copyright © [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://achfoam.com/Lost-Foam-Casting-Process>
- [29] EPS-Vorschäumer - Vorschäumer. [online]. Dostupné z: <http://www.kurtzsa.de/moulding-machines/produkte/schaumstoffmaschinen/vorschaeumer/produkt-details/eps-vorschaeumer.html>
- [30] JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv)*. Ostrava: P. Jelínek, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
- [31] LOST FOAM DI COMPONENTI IN LEGA DI ALLUMINIO. *302 Found* [online]. Dostupné z: http://www.ing.unitn.it/~colombo/LOST_FOAM/Pages/Lost_Foam_Leghe_Al.html
- [32] Polystyren EPS a extrudovaný polystyren XPS – srovnání. *Tepelná izolace* [online]. Copyright © 2006 [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <http://www.tepelna-izolace.cz/polystyren-eps-a-extrudovany-polystyren-xps-srovnani.html>
- [33] <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
- [34] http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tlakova_zkouska.pdf
- [35] <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>
- [36] KARCHOVÁ, Lenka. *Využití metody Lost Foam pro výrobu kovových pěn s pravidelnou buňkovou strukturou*. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava, 2014.
- [37] MICHNA, Š., et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 2005, s. 642-653. ISBN 80-89041-88-4 642-653.